



**Cátia Rita dos Santos
Raposo**

**Avaliação do Ciclo de Vida do reforço sísmico de
estruturas pré-fabricadas de betão armado com
recurso ao BIM**



**Cátia Rita dos Santos
Raposo**

**Avaliação do Ciclo de Vida do reforço sísmico de
estruturas pré-fabricadas de betão armado com
recurso ao BIM**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutora Ana Cláudia Relvas Vieira Dias
Equiparada a Investigadora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro.

agradecimentos

Expresso aqui o meu agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse dar este salto qualitativo.

Começo por agradecer à Professora Doutora Fernanda Rodrigues, pelo incansável apoio, interesse manifestado, pela partilha de informação e pela sua dedicação e orientação excecional.

Agradeço ao meu co-orientador, Professor Doutor Hugo Rodrigues pela disponibilidade e apoio ao longo desta dissertação.

A todos os meus amigos, especialmente à Vanise e ao João, pela paciência e apoio durante esta jornada.

Por último, queria agradecer ao meu marido, aos meus pais e às minhas irmãs, pelo apoio incondicional e incentivo para que eu pudesse atingir esta fase tão importante na minha vida.

Este trabalho foi financiado por: Projeto PTDC/ECI-EST/28439/2017 - POCI-01-0145-FEDER-028439 - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e com o apoio financeiro da FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC).



palavras-chave

Avaliação do ciclo de vida; Custo do ciclo de vida; construção sustentável; elementos pré-fabricados; betão armado; reforço sísmico; BIM; Revit; Tally.

Resumo

À importância socioeconómica do setor da construção, contrapõe com o seu elevado impacto ambiental devido ao consumo intensivo de recursos naturais e energéticos ao longo de toda a vida útil dos empreendimentos. Assim, este setor de atividade tem vindo a ser objeto de ações que promovam uma construção de baixo carbono, dado o seu potencial para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, que incidem, entre outras, na construção e reabilitação com materiais e técnicas mais sustentáveis.

Com o desenvolvimento da metodologia *Building Information Modelling* (BIM), surge a possibilidade de se desenvolverem as diversas especialidades dum projeto de forma integrada e colaborativa desde a sua fase inicial, facilitando também a integração da avaliação de ciclo de vida (ACV).

Esta dissertação tem como objetivo avaliar e comparar os impactos ambientais de elementos pré-fabricados de betão numa construção nova e de soluções de reforço sísmico desses elementos num edifício existente, bem como dos respetivos custos, através de metodologias de ACV e de avaliação dos custos do ciclo de vida (CCV).

Para se efetuar a ACV, numa abordagem *cradle-to-grave*, utilizou-se a metodologia BIM-ACV, com recurso a software específico. Para tal foi desenvolvido o modelo BIM de um edifício industrial com estrutura pré-fabricada em betão armado relativamente ao qual se efetuou a ACV. Foi considerado o modelo de um edifício semelhante com 30 anos de existência, em que no cálculo estrutural não foi considerado a segurança às ações sísmicas. Analisou-se a respetiva solução de reforço sísmico e efetuou-se a correspondente ACV. Para cada caso foi calculado o CCV.

A análise dos dois edifícios permitiu concluir que uma análise ACV baseada na metodologia BIM leva a que a equipa de projeto efetue facilmente diferentes simulações de soluções construtivas mais sustentáveis e que possa, de forma automática, extrair os dados necessários para as diversas análises que pretendam efetuar. Permitiu também destacar a importância da reabilitação no setor da construção, dado que os impactos ambientais e os custos associados, são mais reduzidos quando comparados com a construção dum edifício novo.

keywords

Life cycle assessment ; Life cycle cost ; Sustainable construction ; Precast elements; seismic strengthening; BIM; Revit; Tally.

abstract

The socioeconomic importance of the construction sector contrasts with its high environmental impact due to the intensive consumption of natural and energy resources throughout the useful life of the buildings. Thus, this sector of activity has been the object of actions that promote a low-carbon construction, given its potential to reduce emissions of greenhouse gases, which affect, among others, the construction and rehabilitation with materials and techniques more sustainable.

With the development of the Building Information Modeling methodology, it is possible to develop the various project specialties in an integrated and collaborative way since its initial phase, also facilitating the integration of life cycle assessment (LCA).

This thesis aims to evaluate and compare the environmental impacts of prefabricated concrete elements of a new construction and solutions of seismic reinforcement of these elements in an existing building, as well as, their costs, through LCA methodology and Life cycle cost evaluate (LCC).

In order to perform the LCA, in a cradle-to-grave approach, the BIM-LCA methodology was used, using a specific software. For this purpose, the BIM model of an industrial building with prefabricated concrete structure was developed for which the LCA was achieved. It was considered the model of a similar building with 30 years of existence, in whose structural calculation was not considered safety to seismic actions. The respective seismic reinforcement solution was analyzed and the corresponding LCA was accomplished. For each case the LCC was calculated.

The analysis of the two buildings allowed to conclude that an LCA based on the BIM methodology leads the project team to easily perform different simulations of more sustainable constructive solutions and that can automatically extract the necessary data for the various analyzes that they wish to achieve. It also highlighted the importance of rehabilitation in the construction sector, since the environmental impacts and the associated costs are reduced when compared to the construction of a new building.

À minha família

Índice

Índice	xiii
Índice de Figuras	xvi
Índice de Tabelas	xviii
Conceitos	xxi
Acrónimos	xxv
Capítulo 1. Introdução	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objeto de estudo	4
1.3. Objetivos	4
1.4. Metodologia	5
1.5. Organização da dissertação	6
Capítulo 2. Custo do ciclo de vida	9
2.1. Teoria fundamental	9
2.2. Fases de aplicação do CCV	10
2.3. Requisitos para a aplicação do CCV	11
2.4. Softwares de cálculo	12
2.5. Metodologia de cálculo do CCV	13
2.6. Dificuldades na aplicação do CCV	13
2.7. CCV e a sua aplicação na reabilitação	14
Capítulo 3. Avaliação do ciclo de vida	19
3.1. Teoria fundamental	19
3.2. Fases da ACV	20
3.3. Variantes da ACV	22
3.4. Softwares de análise ACV	22
3.5. Dificuldades da aplicação da ACV no sector da construção	23
3.6. ACV e a sua aplicabilidade na reabilitação	24

Capítulo 4.	Building Information Modeling.....	29
4.1.	Enquadramento	29
4.2.	Benefícios e riscos na aplicação	30
4.3.	Ferramentas BIM	31
4.4.	Domínios do BIM	32
Capítulo 5.	Integração da ACV e do BIM no sector da construção	37
5.1.	Introdução	37
5.2.	ACV no sector da construção	37
5.2.1.	A nível global	39
5.2.2.	Em Portugal	44
5.3.	ACV em soluções estruturais	48
5.3.1.	A nível global	49
5.3.2.	Em Portugal	51
5.4.	Relação entre o ACV e o BIM.....	53
Capítulo 6.	Caso de estudo	63
6.1.	Introdução	63
6.2.	Caracterização do edifício e do local de obra.....	63
6.2.1.	Pavilhão industrial novo	63
6.2.2.	Pavilhão industrial existente.....	65
6.3.	Metodologia.....	66
6.3.1.	Tally.....	69
6.3.2.	Cálculo da ACV.....	70
6.3.3.	Cálculo do CCV.....	80
Capítulo 7.	Discussão de resultados	85
7.1.	Introdução	85
7.2.	Interpretação dos resultados obtidos.....	85
7.2.1.	Avaliação do ciclo de vida.....	85

7.2.2. Custo do ciclo de vida	95
Capítulo 8. Considerações finais	111
8.1. Conclusões	111
8.2. Desenvolvimentos futuros	113
Referências bibliográficas	117
Anexos	135
A. <i>Softwares</i> CCV	135
B. Vantagens e desvantagens dos métodos de avaliação económica	136
C. <i>Softwares</i> de ACV.....	137
D. Plantas de arquitetura.....	140
E. Dados justificativos	146

Índice de Figuras

Figura 1- Requisitos para a aplicação do custo do ciclo de vida.....	12
Figura 2- Economia num projeto com base no CCV, ao longo do tempo.....	15
Figura 3- Fases do ciclo de vida	20
Figura 4- Representação esquemática das variantes da avaliação do ciclo de vida	22
Figura 5- Domínio do BIM.....	33
Figura 6 - Estudo do ACV em edifícios residenciais e comerciais entre 2000 e 2019	38
Figura 7 - Estudos de ACV em edifícios residenciais	39
Figura 8 - Estudos de ACV em edifícios comerciais.....	39
Figura 9-Estudos de ACV publicados entre 2011 e 2019, a nível global.....	41
Figura 10-Países com maior número de publicações em ACV	42
Figura 11-Estudo de ACV em Portugal.....	44
Figura 12-Estudos BIM-ACV a nível global.....	54
Figura 13- Países com maior número de publicações em estudos BIM-ACV	54
Figura 14-Fotos do edifício após a construção	64
Figura 15-Vista 3D do pavilhão novo	65
Figura 16-Vista 3D do pavilhão existente	66
Figura 17-Fases de implementação das metodologias ACV e CCV no pavilhão novo e no pavilhão existente	67
Figura 18- Metodologia de trabalho	68
Figura 19- Módulos de informação aplicados na avaliação do desempenhos económico de um edifício	71

Figura 20-Módulos de avaliação calculados pelo Tally	71
Figura 21-Solução proposta de reforço sísmico	75
Figura 22- Ligação painel-pilar	75
Figura 23-Metodologia exemplificativa: dados do inventário, <i>midpoints</i> , <i>endpoints</i> e áreas de impacto.....	77
Figura 24- Impactes ambientais por m ² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício novo	89
Figura 25-Impactes ambientais por m ² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício existente.....	90
Figura 26- Impacto dos elementos no pavilhão novo.....	91
Figura 27-Impacte por ligação no pavilhão existente.....	92
Figura 28-Percentagem atribuída para reciclagem e para aterro dos materiais	93
Figura 29-Comparação entre o Pavilhão novo e o pavilhão existente	95
Figura 30- Dados considerados no cálculo da demolição de um edifício	100
Figura 31-Percentagem de gastos no pavilhão novo e no pavilhão existente	106
Figura 32-Planta de cobertura.....	140
Figura 33-Planta de pilares	141
Figura 34-Planta do alçado principal.....	142
Figura 35-Planta do alçado posterior.....	143
Figura 36-Planta do alçado lateral esquerdo.....	144
Figura 37-Planta do alçado lateral esquerdo.....	145

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exemplo de estudos ACV em edifícios.....	40
Tabela 2-Descrição dos materiais.....	74
Tabela 3-Descrição dos materiais utilizados no reforço sísmico	76
Tabela 4-Quantidade de cachorros por pilar.....	81
Tabela 5- Quantidade de material obtida no modelo BIM 3D para o pavilhão novo.....	85
Tabela 6-Quantidade de material calculada e obtida no pavilhão existente.....	86
Tabela 7- Impactes ambientais totais obtidos a partir do cálculo da equivalente funcional dos elementos do pavilhão novo, por m ² de área construída, para um período de vida útil de 50 anos.....	87
Tabela 8- Impactes ambientais totais obtidos a partir do cálculo da equivalente funcional dos elementos do pavilhão existente, por m ² de área construída, para um período de vida útil de 20 anos.....	87
Tabela 9-Impactes ambientais por m ² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício novo	88
Tabela 10- Impactes ambientais por m ² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício existente.....	89
Tabela 11-Impactes ambientais por m ² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício novo e do edifício existente.....	90
Tabela 12- Comparação entre a quantidade de material a reciclar e a depositar em aterro na demolição do pavilhão novo.....	93
Tabela 13-Comparação entre a quantidade de material a reciclar e a depositar em aterro na demolição de um pavilhão existente.....	94
Tabela 14-Custo total de execução dos pilares.....	96
Tabela 15-Custo total de execução das vigas	97
Tabela 16- Custo total de execução dos painéis	97

Tabela 17- Custo total de execução dos elementos pré-fabricados do edifício.....	99
Tabela 18- Custo total da demolição de um edifício	100
Tabela 19-Resíduos gerados contabilizando a demolição de elementos pré-fabricados (Tally)	101
Tabela 20-Custo da demolição dos elementos pré-fabricados	101
Tabela 21- Custo total dos varões da ligação viga-viga	102
Tabela 22-Custo total do Grout	102
Tabela 23- Custo do equipamento na colocação dos varões	102
Tabela 24-Custo do elemento de fixação ligação viga-pilar	103
Tabela 25-Custo dos varões de ligação	103
Tabela 26- Custo da mão de obra na colocação dos varões	103
Tabela 27- Custo do equipamento na colocação dos varões	104
Tabela 28- Custo do elemento de fixação ligação viga-pilar	104
Tabela 29- Custo do equipamento na colocação dos elementos de fixação.....	104
Tabela 30-Custo total do reforço sísmico.....	105
Tabela 31-Custo total do reforço sísmico e da demolição do pavilhão existente.....	105
Tabela 32-Comparação entre o pavilhão novo e o pavilhão existente	106

Conceitos

Ativo

Trata-se de todo o edifício ou estrutura, sistema ou um componente ou parte (ISO 15686-5, 2017).

Avaliação do Ciclo de Vida

Compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ISO, 2006).

Categoria de impacto

Classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados do Inventário do Ciclo de Vida podem ser associados (ABNT, 2004).

Cash flow

Representa a diferença entre as entradas e saídas de dinheiro de uma empresa durante um determinado período de tempo (Lima, 2012).

Ciclo de Vida

Fases consecutivas e interligadas de um sistema de produto, desde a aquisição de matéria-prima ou sua produção a partir de recursos naturais até ao destino final (ISO, 2006).

Desenvolvimento Sustentável

Refere-se ao desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades (Brundtland, 1987). O desenvolvimento sustentável comporta um triplo objetivo: um desenvolvimento economicamente eficaz, socialmente equitativo e ecologicamente sustentável (Ortiz, Castells and Sonnemann, 2009).

Equivalente Funcional

As comparações entre os resultados das avaliações dos edifícios ou sistemas instalados, na fase de conceção ou sempre que os resultados sejam utilizados, devem ser feitas apenas na

base da sua equivalência funcional. Para tal, é necessário descrever os principais requisitos funcionais, juntamente com a utilização prevista e os requisitos técnicos específicos e relevantes, de modo a determinar a equivalência funcional de diferentes opções e tipos de edifícios, o que permite obter comparações transparentes e razoáveis (NP 15643-2, 2014).

IFC (*Industry Foundation Classes*)

IFC representa um esquema de dados para partilha de informação durante a construção e gestão de instalações em várias aplicações usadas no domínio da indústria da arquitetura, engenharia e construção e do *Facility Management* (BuildingSmart, 2019). É responsável pela interoperabilidade entre os diferentes sistemas BIM e trata-se de uma abordagem para apoiar a integração com outras aplicações, permitindo a importação e exportação de dados em vários formatos (Eastman, et al., 2011).

Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Fase da avaliação do ciclo de vida que envolve a compilação e a quantificação de entradas e saídas, para um determinado sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ISO, 2017).

Interoperabilidade

Interoperabilidade é a capacidade de trocar dados entre aplicações, que permite os fluxos de trabalho e, por vezes facilita a sua automatização (Eastman, et al., 2011).

Vida Útil de Projeto

A vida útil de projeto é “período de tempo, após a construção, em que o edifício ou seus elementos, igualam ou excedem os requisitos mínimos de desempenho” (EN, 2015).

Reabilitação de Edifícios

A reabilitação de edifícios é definida como a “forma de intervenção destinada a conferir adequadas características de desempenho e de segurança funcional, estrutural e construtiva a um ou a vários edifícios, às construções funcionalmente adjacentes incorporadas no seu logradouro, bem como às frações eventualmente integradas nesses edifícios, ou conceder-lhes novas aptidões funcionais, determinadas em função das opções de reabilitação urbana prosseguidas com vista a permitir novos usos ou o mesmo uso com padrões de desempenho

mais elevados, podendo compreender uma ou mais operações urbanísticas” (DL n.o 66/2019, de 21 de Maio).

Acrónimos

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AEC	<i>Architecture, Engineering and Construction</i>
AICV	Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
CAE	Custo Anual Equivalente
CCV	Custo do Ciclo de Vida
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OCCC	Orçamentos e Orçamentação na Construção Civil
NBS	<i>National Building Specification</i>
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
TRACI	<i>Tool for the Reduction Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts</i>
VAL	Valor Atual Líquido
VUE	Vida Útil Estimada

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1. Introdução

- 1.1. Enquadramento
- 1.2. Objeto de estudo
- 1.3. Objetivos
- 1.4. Metodologia
- 1.5. Organização da dissertação

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nas últimas décadas tem-se registado um aumento considerável da população mundial e, como consequência, a exploração de recursos e a produção de resíduos tem crescido.

Dado que este consumo afeta o meio ambiente, diversos estudos têm previsto cenários desastrosos, caso não se altere o comportamento Humano (IPCC, 2014). Por isso, urge, cada vez mais, a necessidade de procurar alternativas inovadoras para alcançar um padrão sustentável (Najjar *et al.*, 2017).

O sector da construção é um dos que mais prejudica o ambiente, pois, produz resíduos e consome uma elevada quantidade de energia e de recursos naturais. Estima-se que só na União Europeia, o setor da construção seja responsável por 50% do consumo de matérias primas, 36% das emissões de dióxido de carbono e 40% do consumo energético (Comission European, 2017; Santos *et al.*, 2019). Como tal, é importante adotar estratégias que visem reduzir o consumo energético, a emissão de gases de efeito de estufa e o impacte ambiental causado pelos materiais e processos construtivos (Antón e Díaz 2014).

Para que estas medidas tenham êxito, para além de ser necessário considerar as características do edifício, a zona climática e o nível de desenvolvimento económico do local onde este está inserido, é crucial, coordenar eficazmente todos os recursos afetos ao projeto, desde a fase de extração de matérias primas até à demolição do edifício.

Atualmente, as revisões bibliográficas mostram que a maioria dos artigos científicos concentra-se na redução do consumo energético e das emissões de CO₂ gerados durante a fase operacional do edifício, dado que esta geralmente tem maior impacto (Dylewski and Adamczyk, 2016; Ji *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2017a). No entanto, outros estudos apontam a necessidade de se reduzir essas emissões na fase de projeto e construção do edifício, através de simulações e combinações de vários materiais de construção (Choi *et al.*, 2016). Hoxha *et al.* (2017) afirmam que a energia incorporada nos materiais de construção pode contribuir para o aquecimento global tanto quanto algumas ações na fase operacional.

Desta forma, é indispensável que haja um planeamento e avaliação dos custos e dos impactes ambientais causados por todas as fases a curto, médio e longo prazo, dado que, a atividade construtiva envolve processos longos e complexos (Marteinsson, 2005).

Porém, estes cuidados não se destinam apenas às construções novas. Todos os anos tem-se registado catástrofes naturais (ex: sismos) que têm causado perdas humanas, económicas e impactes no meio ambiente. Perante tais acontecimentos, o edificado existente, com alguns anos de construção, tem apresentado algumas anomalias a nível funcional e estrutural, pelo que, muitos edifícios necessitam de ser reabilitados, de forma a melhorar a sua segurança e/ou estender a sua vida útil. Esta ação, para além de preservar os elementos construídos, reduz a quantidade de demolições de edifícios.

Assim, esta dissertação irá incidir fundamentalmente na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em cooperação com a metodologia *Building Information Modelling* (BIM). Para além disso, será calculado o Custo de Ciclo de Vida (CCV) de forma a apoiar na tomada de decisão.

1.2. Objeto de estudo

O objeto de estudo desta dissertação será a aplicação da metodologia ACV e CCV a duas alternativas:

- (1) construção e demolição (no final da sua vida de serviço) dos elementos pré-fabricados de um pavilhão industrial novo cujo cálculo estrutural considerou as ações sísmicas, situado em Santa Maria da Feira, no distrito de Aveiro;
- (2) reabilitação com reforço sísmico e demolição dos elementos pré-fabricados de um pavilhão semelhante, com 30 anos de existência e cujo cálculo estrutural não teve em consideração a ação sísmica (pavilhão simulado).

Com base na metodologia BIM, pretende-se modelar os edifícios no software Autodesk Revit, introduzindo neste, dados para avaliar o desempenho ambiental dos materiais e dos processos construtivos, ao longo do seu ciclo de vida.

1.3. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivos (1) determinar, entre as alternativas mencionadas no ponto anterior, a opção com menor impacto ambiental e com menor custo associado e (2) avaliar a integração da metodologia ACV em modelos BIM. Para isso, comparam-se os

custos e os impactes ambientais associados a cada um dos casos, com o auxílio da metodologia BIM.

De forma a contribuir na área da sustentabilidade, pretende-se assim, perceber qual opção é mais sustentável, reabilitar ou construir um edifício novo.

1.4. Metodologia

Para se alcançar os objetivos propostos foi realizada uma pesquisa bibliográfica das metodologias de ACV e CCV, de modo a esclarecer conceitos, aplicações e benefícios da sua aplicação que visam reduzir o impacto ambiental dos materiais e dos processos construtivos, bem como, a relação entre o ACV, o CCV e o BIM.

De forma a obter resultados fidedignos, surge a necessidade de recorrer ao modelo BIM 3D, que associado às ferramentas e funcionalidades desta metodologia, irá permitir a incorporação, visualização, consulta e extração de informação sobre o edifício em estudo. Assim, efetuou-se o modelo 3D BIM com recurso ao software Autodesk Revit da estrutura de um edifício industrial novo, com base num projeto, e calculou-se a ACV e o CCV dos elementos estruturais pré-fabricados.

Do mesmo modo, numa segunda fase realizou-se a modelação de um edifício industrial existente, seguida do cálculo do desempenho ambiental e dos custos imputáveis ao reforço sísmico dos elementos pré-fabricados. Uma vez que é um edifício hipotético, a geometria das secções terá como base 16 projetos anteriores ao ano 2000.

Assim, será aplicada a metodologia do ACV e CCV na reabilitação (reforço sísmico de um edifício existente) e na construção dos elementos pré-fabricados de um edifício novo. A utilização da metodologia ACV e CCV, permitirá, a escolha de uma opção com menor impacto ambiental e custo associado. Em ambos os casos, o cálculo da ACV foi efetuado com recurso ao software Tally, um plug-in do Revit.

Por fim, foram analisadas e comparadas as duas alternativas: a construção nova dos elementos estruturais pré-fabricados e o reforço sísmico de uma estrutura existente.

Este trabalho surge numa altura em que é importante comparar os impactes económicos e ambientais da reabilitação de um edifício existente e da construção de um edifício novo, a fim de se analisar que alternativa é mais sustentável.

1.5. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos.

No Capítulo 1 efetua-se o enquadramento do tema, descrevem-se os objetivos do estudo e sintetiza-se a metodologia desenvolvida.

No Capítulo 2, através de pesquisa bibliográfica, descreve-se a metodologia CCV, os seus objetivos, fases, requisitos e dificuldades na aplicação, os softwares e a metodologia de cálculo e a sua aplicabilidade na reabilitação.

O Capítulo 3 contém a descrição da abordagem da metodologia ACV, os seus objetivos, as aplicações, as fases, os softwares de análise, as desvantagens da aplicação e a sua aplicabilidade na reabilitação.

O Capítulo 4 destina-se ao desenvolvimento da metodologia BIM, dos seus benefícios e riscos na aplicação, as suas ferramentas e os seus domínios.

No Capítulo 5 é abordada a integração da metodologia da ACV na metodologia BIM. Para tal, é feita uma pesquisa bibliográfica relativamente à aplicação da ACV em edifícios correntes, tanto em Portugal como a nível global, e da aplicação da ACV em soluções estruturais, também em Portugal e a nível global. Por último é feita uma relação entre a ACV e o BIM.

No Capítulo 6, apresenta-se o caso de estudo. É feita a caracterização do edifício e do local de obra, define-se a metodologia a aplicar e efetua-se o cálculo da ACV e do CCV do edifício novo e do edifício existente.

O Capítulo 7 destina-se à discussão e interpretação dos resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 8, tecem-se as considerações finais e as propostas de desenvolvimento para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Custo do Ciclo de Vida

Capítulo 2. Custo do Ciclo de Vida

2.1. Teoria Fundamental

2.2. Fases de aplicação do CCV

2.3.Requisitos para a aplicação do CCV

2.4.Software de cálculo

2.5.Metodologia de cálculo do CCV

2.6.Dificuldades na aplicação do CCV

2.7.CCV e a sua aplicabilidade na reabilitação

Capítulo 2. CUSTO DO CICLO DE VIDA

2.1. Teoria fundamental

Segundo a norma ISO 15686-5 (2017), o Custo do Ciclo de Vida (CCV) de um edifício “é uma técnica que pode ser utilizada para prever e avaliar o desempenho de custos de ativos construídos”.

O CCV permite selecionar, com base nas alternativas existentes, a opção mais eficiente e económica, atendendo sempre aos requisitos de desempenho do cliente. Consiste no somatório de estimativas de custos, desde a fase de conceção até à deposição final, o que permite a longo prazo, otimizar os custos do edifício (Schade, 2007).

Os principais objetivos de aplicação do CCV são (Woodward, 1997):

- Avaliar opções de investimento com maior eficácia;
- Considerar o impacto dos custos ao longo do ciclo de vida e não focar apenas no capital investido inicialmente;
- Apoiar a gestão eficaz dos edifícios e projetos concluídos;
- Facilitar a escolha entre alternativas concorrentes.

Por ser um método que contabiliza os custos de investimento de um projeto, tendo em conta a sua vida útil, o CCV acaba por ser mais objetivo e irrefutável quando comparado com o ACV. Contudo, ambos são extremamente importantes, uma vez que um produto sustentável deve ter um custo razoável e ser rentável para que seja aceite no mercado (Andrade, 2013). Antes de ser aplicada, acreditava-se que o principal custo na construção era o de produção, porém, ao analisar detalhadamente o ciclo de vida de um edifício, concluiu-se que o custo inicial é tão importante quanto o custo de manutenção, dado que, é preferível optar por materiais mais caros, mas com características mais fiáveis e duradouras, do que optar por materiais mais económicos, que requerem manutenções e substituições frequentes (Matos, 2017).

Por isso, reforça-se a importância de se contabilizar todos os custos e soluções na fase de projeto, já que os maiores gastos estão associados à fase de operação, manutenção e deposição, que variam entre 2 a 20 vezes dos custos iniciais de construção (Andrade, 2013). Apesar da aplicação do CCV ser bastante vantajosa, de acordo com USDT (2002), um custo

menor não deve ser prioridade quando é necessário considerar o risco, o orçamento disponível e as questões políticas e ambientais. O CCV fornece informações importantes, mas não deve ser o fator decisivo.

2.2.Fases de aplicação do CCV

A eficácia da aplicação do CCV depende da realização das seguintes fases (USDT, 2002):

- Estabelecimento de alternativas de projeto;
- Determinação do planeamento da manutenção e reabilitação;
- Estimativa de custos;
- Cálculo do custo do ciclo de vida;
- Análise dos resultados.

Estabelecimento de alternativas de projeto

Nesta primeira fase, as componentes para cada alternativa são analisadas e é definida a duração do ciclo de vida da cada uma. Geralmente, alternativas diferentes requerem uma manutenção e reabilitação diferentes, portanto, é necessário definir o tipo de manutenção, o período de execução e os custos associados. Cada alternativa deve incluir durante o seu ciclo de vida, pelo menos uma grande intervenção (reabilitação).

Determinação do planeamento da manutenção e reabilitação

Após a identificação das atividades, desenvolve-se a manutenção e o plano de reabilitação de cada uma. Este plano resulta num cronograma que indica quando é que irão ocorrer as atividades de reabilitação e manutenção. É necessário que haja uma elevada precisão para que a estratégia adotada seja eficaz.

O planeamento da manutenção deve considerar a vida útil e a durabilidade dos materiais e dos sistemas construtivos, para que assim, seja possível prever a periodicidade das ações de manutenção. Contudo, há situações que não podem ser previstas (por ex: reposição de elementos danificados devido ao vandalismo ou catástrofes naturais), o que leva a concluir que a quantificação do custo real da manutenção de um edifício não é simples.

Estimativa de custos

O CCV não obriga a que todos os custos de cada alternativa sejam calculados. Só é obrigatório explorar os custos que demonstrem diferenças entre alternativas. Esta distinção é importante porque simplifica os requisitos analíticos e de dados.

Cálculo do custo do ciclo de vida

Nesta fase, o objetivo é calcular os CCV totais de cada alternativa e compará-los diretamente. Porém, é necessário que seja efetuada a conversão dos custos ocorridos em diferentes datas para o valor real, num momento comum na escala temporal. O indicador económico mais recomendado é o Valor Atual Líquido (VAL).

Como complemento, pode-se no entanto, desenvolver diagramas de fluxo de despesas que descrevam as atividades iniciais e futuras e os respetivos custos. Isto permite visualizar a quantidade e a frequência de gastos projetados ao longo da vida útil do edifício.

Análise dos resultados

A última fase consiste em analisar e interpretar os resultados obtidos. É necessário reavaliar as alternativas, verificar se é necessário realizar modificações em cada uma delas, analisar a estimativa de custos e comparar com as demais. Após esta fase pode-se concluir sobre qual é a alternativa mais conveniente e que representa um maior custo-benefício ao longo da vida útil do edifício (Woodward, 1997).

2.3.Requisitos para a aplicação do CCV

A análise do CCV preocupa-se com a otimização dos custos dos ativos, mas a sua concretização depende da fiabilidade e rapidez das informações. Os dados necessários para o cálculo do CCV podem ser divididos em cinco grupos principais: dados de ocupação, dados físicos, dados de desempenho, dados sobre a qualidade e dados de custo. A Figura 1 mostra os requisitos para a aplicação do CCV.

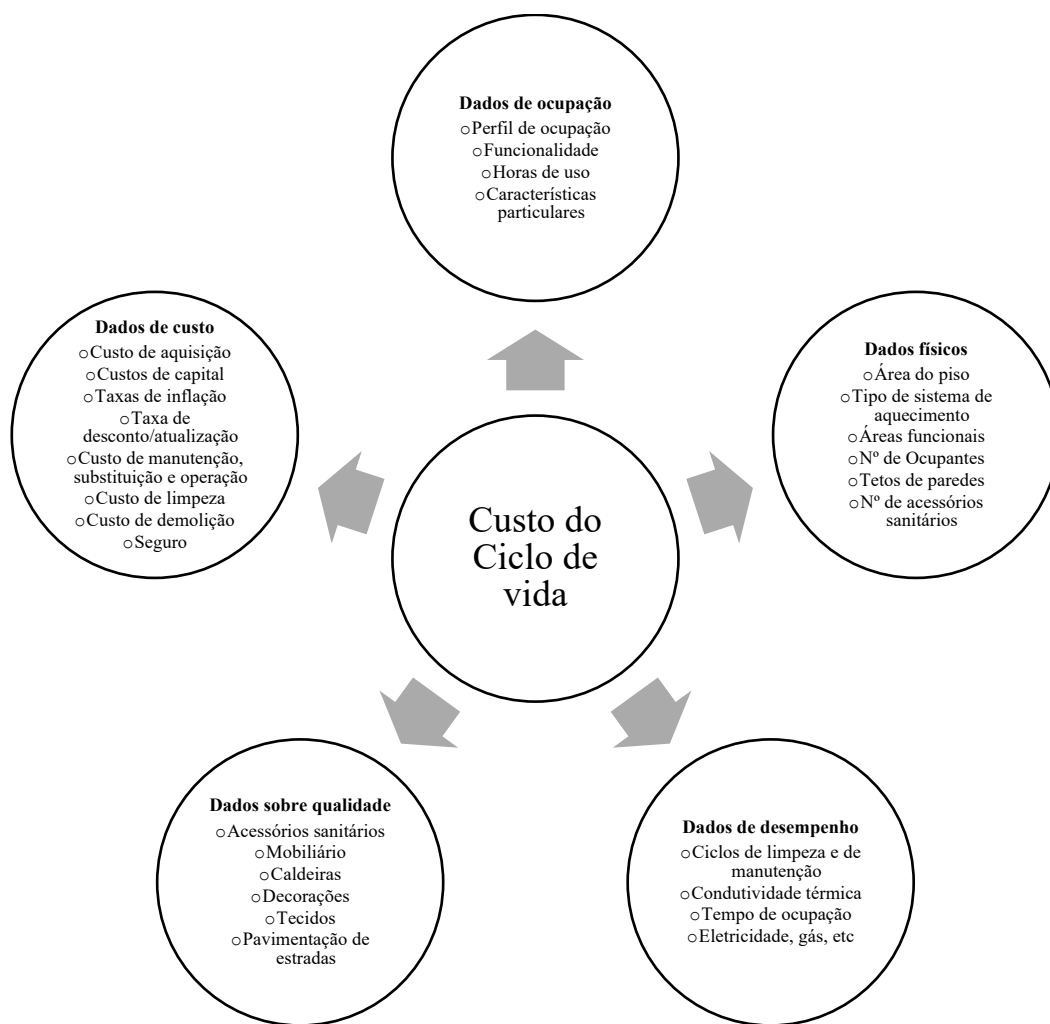


Figura 1- Requisitos para a aplicação do custo do ciclo de vida (adaptado de Schade, 2007)

2.4. Softwares de cálculo

O processo de cálculo do CCV envolve um cálculo simples, porém moroso. Como tal, foram desenvolvidas ferramentas para facilitar a quantificação de custos para apoiar processos de tomada de decisão. As mais utilizadas são o ACEIT, o LCCWARE 3.0 e o RealCost 2.1 (Matos, 2016).

No Anexo A podem-se encontrar mais detalhes sobre cada uma das ferramentas mencionadas.

2.5. Metodologia de cálculo do CCV

Para que a aplicação do CCV seja eficaz, é necessário ter em conta o valor temporal do dinheiro, uma vez que envolve processos de estimativas de custo a longo prazo, resultantes de dois fatores (Matos, 2016):

- Da inflação, que é um fator que reduz o poder de compra ao longo do tempo;
- Do custo de oportunidade, que traduz o benefício do dinheiro investido não ser aplicado de forma diferente.

Assim sendo, não pode haver uma comparação direta dos custos de um edifício ao longo do tempo, pois este tem momentos de vida útil diferentes. É necessário recorrer a indicadores económicos que possibilitem a comparação entre diferentes alternativas (Schade, 2007).

A abordagem mais comum é a do Valor Atual Líquido que desconta todos os *cash flows* futuros para o ano base, porém, para comparar alternativas com diferentes tempos de vida útil, o método mais adequado é o Custo Anual Equivalente (CAE). Nos casos em que se pretenda uma estimativa grosseira para distinguir se o investimento é rentável ou não, o cálculo do tempo de retorno (*payback* simples) é o mais indicado (Schade, 2007; Matos, 2016). No Anexo B são apresentados os diferentes indicadores económicos com as respetivas vantagens e desvantagens (Schade, 2007).

2.6. Dificuldades na aplicação do CCV

Apesar do cálculo do CCV fornecer uma metodologia para se efetuar a análise financeira de investimentos, ainda não se tornou numa ferramenta corrente de avaliação de projetos, devido à falta de compreensão relativamente à sua utilidade no apoio ao investimento. Para além disso, os edifícios são mais difíceis de avaliar devido (Cabeza *et al.*, 2014):

- Elevada complexidade e diversidade de materiais e sistemas construtivos;
- São dinâmicos no tempo, devido à vida útil limitada dos seus componentes;
- Estão sujeitos à mudança de requisitos dos utilizadores.

Não obstante, existe ainda a dificuldade na recolha de dados, visto que, é um processo que envolve muitos recursos. Como consequência desta falta de exatidão, o nível de confiança reduz-se e surgem incertezas.

Segundo Woodward (1997), as cinco principais fontes de incerteza são:

- Diferenças entre o desempenho real e o esperado dos subsistemas, o que pode afetar operações futuras e custos de manutenção;
- Mudanças nas premissas operacionais decorrentes de modificações de atividades do utilizador;
- Futuros avanços tecnológicos que podem fornecer alternativas com custos mais baixos e reduzir a vida útil económica de um dos sistemas propostos;
- Mudanças nos níveis de preços de um recurso importante (por exemplo: energia ou mão de obra), em relação a outros recursos que podem afetar e alterar custos futuros;
- Erros estimados em taxas e preços para determinados recursos e da taxa de inflação nos custos gerais, associados à estimativa de tempo para a disponibilidade do ativo.

2.7.CCV e a sua aplicação na reabilitação

Para se manter o nível de desempenho expectável, devem ser objeto de manutenção periódica, os ativos de construção. Fatores como as condições atmosféricas e o desgaste, fazem com que vários componentes de uma edificação sofram degradação ao longo do tempo. Se não houver um plano de manutenção adequado, a edificação irá degradar-se rapidamente e consequentemente irá diminuir a sua vida útil.

A qualidade da conceção e construção tem um impacto significativo na vida útil e nos requisitos de manutenção associados. Portanto, é crucial aplicar a metodologia do CCV na otimização dos custos de reabilitação, na posse e na operação de bens físicos ao longo da sua vida útil, através da tentativa de identificação e quantificação de todos os custos significativos envolvidos em todo o período, utilizando técnicas de previsão de custos (Matos, 2016).

Esta abordagem de suporte à tomada de decisão, permite ter uma perspetiva a longo prazo para o processo de investimento, em vez de existir uma tentativa de economizar a curto prazo (Woodward, 1997).

Assim, embora os maiores custos estejam associados à fase de utilização e manutenção, a Figura 2 mostra que, se as intervenções de manutenção forem planeadas ou evitadas, poder-se-á ter uma significativa poupança económica a longo prazo.

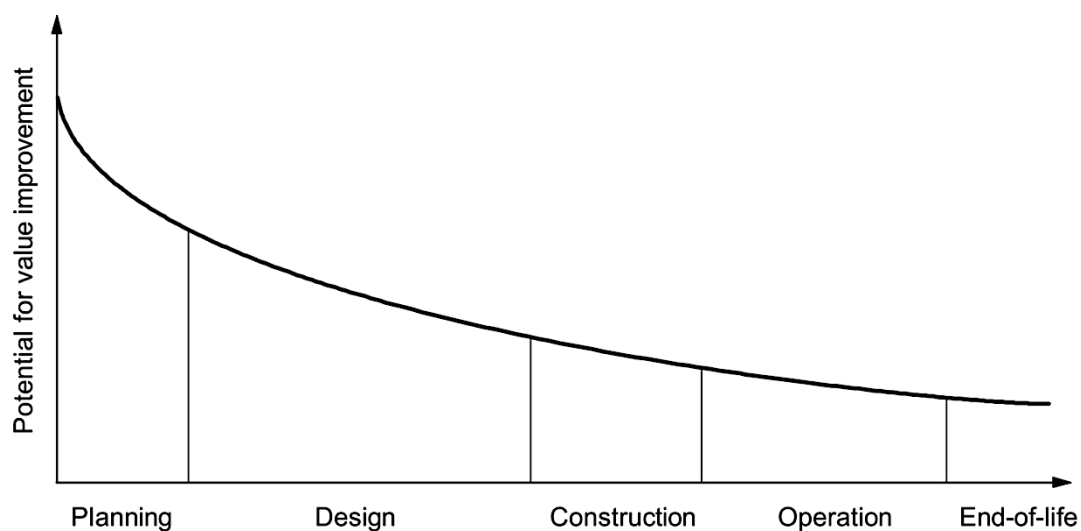


Figura 2- Economia num projeto com base no CCV, ao longo do tempo (ISO 15686-5, 2017)

Capítulo 3

Avaliação do Ciclo de Vida

Capítulo 3. Avaliação do Ciclo de Vida

3.1. Teoria Fundamental

3.2. Fases da ACV

3.3. Variantes da ACV

3.4. Softwares de análise ACV

3.5. Dificuldades da aplicação da ACV no setor da construção

3.6. ACV e a sua aplicabilidade na reabilitação

Capítulo 3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

3.1. Teoria fundamental

Segundo Ciambrone (1997), a Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta que visa avaliar sistematicamente o desempenho ambiental de produtos e/ou processos ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até eliminação ou deposição do produto. A sua aplicação foca-se em estratégias para minimizar os impactos ambientais e o consumo de recursos e promover a reciclagem e a reutilização de materiais de construção (Ortiz, Castells e Sonnemann 2009).

Segundo a ISO 14040: 2006 citada por Andrade (2013), a metodologia da ACV tem como principais objetivos:

- Quantificar e avaliar o desempenho ambiental de um produto ou de um processo, desde a sua extração até à deposição final;
- Ajudar na tomada de decisões na seleção de produtos e serviços;
- Avaliar o impacto das atividades humanas no meio ambiente;
- Avaliar possíveis melhorias no desempenho ambiental de um sistema de produtos;
- Observar a interação entre uma atividade e o ambiente.

As aplicações da ACV podem ser de carácter público ou privado. Dessas destacam-se as seguintes (Pieragostini, Mussati and Aguirre, 2012):

- Planeamento estratégico ambiental para a escolha da opção mais praticável;
- Otimização do design e inovação dos produtos e respetivos processos;
- Criação de uma ferramenta para gestão do sistema ambiental e relatórios ambientais.

Para além do conceito de ACV, existem outras abordagens para avaliar o impacto ambiental dos edifícios como a Avaliação Energética do Ciclo de Vida (AECV), porém, a ACV é a metodologia mais adequada para se atingir a construção sustentável, pois, permite escolher qual a solução que corresponde aos seus requisitos.

3.2.Fases da ACV

Devido à exclusividade de cada edifício, a aplicação da ACV será sempre diferente, porém, é necessário cumprir algumas fases para que a avaliação do ciclo de vida seja muito próxima à realidade.

Segundo a ISO14040: 2006, um estudo da avaliação do ciclo de vida divide-se nas seguintes fases:

1. Definição do objetivo e âmbito
2. Inventário
3. Avaliação do impacto ambiental
4. Interpretação

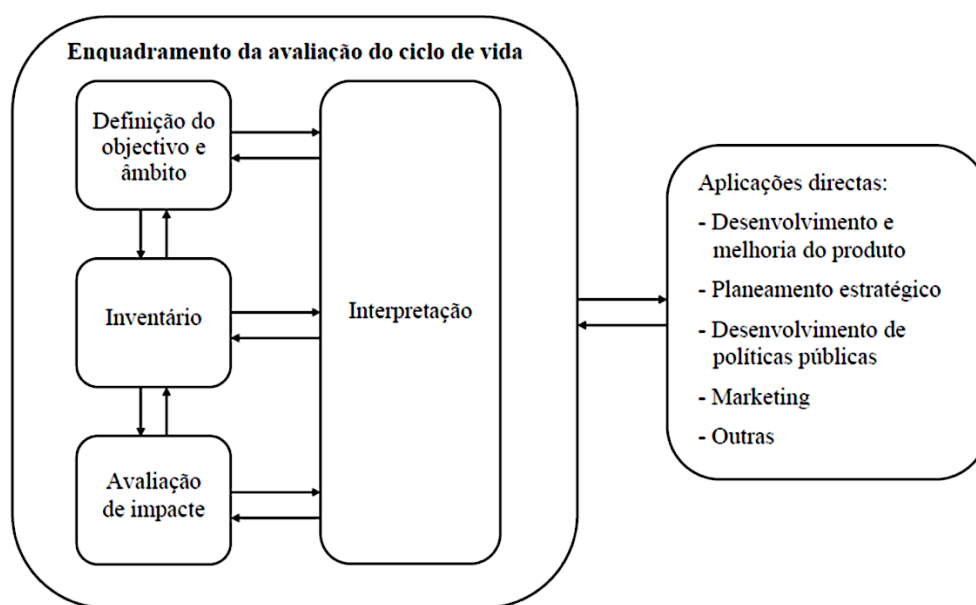


Figura 3- Fases do ciclo de vida (Maia, 2013)

Definição do objetivo e âmbito

Esta fase tem como propósito definir: os objetivos de estudo, o público alvo a que se destina o estudo, e a função do sistema de produto, a equivalente funcional, as condições fronteira, as categorias de impacto, a metodologia para a alocação dos impactos e consumo de matérias primas em cada fase, a estratégia de recolha de dados e as possíveis limitações (Mateus,

2009; NP 15643-2, 2014). Destes objetivos, deve-se enfatizar a equivalente funcional e as condições fronteira (Maia, 2013).

A equivalente funcional tem como objetivo assegurar a compatibilidade entre os dados de entrada e de saída. Para tal, é necessário definir o objeto de estudo e quantificar o desempenho do sistema para utilização como unidade de referência. As condições fronteira definem os processos unitários a serem incluídos no sistema. Este deve permitir que as entradas e saídas na sua fronteira sejam fluxos elementares.

Inventário

Esta fase engloba a recolha e descrição dos dados para a determinação das entradas e saídas relevantes de um sistema. Um inventário do ciclo de vida faz a quantificação das matérias primas, do consumo de energia, das emissões de gases de efeito de estufa, do uso da água e de resíduos sólidos produzidos durante o ciclo de vida do produto ou processo. Este deve ser organizado da seguinte forma (Maia, 2013):

- Construção da árvore do processo;
- Recolha de dados;
- Procedimentos de cálculos.

Por vezes podem ser identificados problemas que requerem uma revisão aos objetivos e do âmbito do projeto.

Avaliação do impacto

Esta fase é definida como sendo um processo quantitativo que avalia os efeitos da utilização de energia, água, materiais e resíduos ambientais identificados no inventário. Tem como objetivo tornar os dados obtidos mais relevantes e facilitar a tomada de decisão. Ou seja, com base nos resultados obtidos no inventário, recorre-se a um processo técnico para avaliar e expor o significado dos potenciais efeitos ambientais (Mateus, 2009).

Interpretação

A interpretação é considerada por muitos a fase mais importante, pois examina os resultados obtidos no inventário e na avaliação do impacto ambiental. Esta deve fornecer dados que

condizem com o objetivo e o âmbito, de forma a poder efetuar a seleção do produto (Mateus, 2009).

3.3. Variantes da ACV

A avaliação do Ciclo de Vida apresenta três variantes, em função das fases do ciclo de vida (Mateus, 2009):

- ***Cradle-to-gate*** (do berço à porta) – Esta variante estuda parte do ciclo de vida do produto. O *cradle-to-gate* analisa o impacto dos materiais desde a sua extração até à conclusão do edifício, sendo que a fase de utilização e deposição final são omitidas.
- ***Cradle-to-grave*** (do berço à sepultura) – Esta variante avalia o impacto que um produto tem aquando da extração das matérias primas (berço), durante a sua utilização, até ao fim da vida útil do edifício (sepultura).
- ***Cradle-to-cradle*** (do berço ao berço) – Faz a mesma avaliação que a variante *cradle-to-grave*, porém, a última fase do produto é a reciclagem.

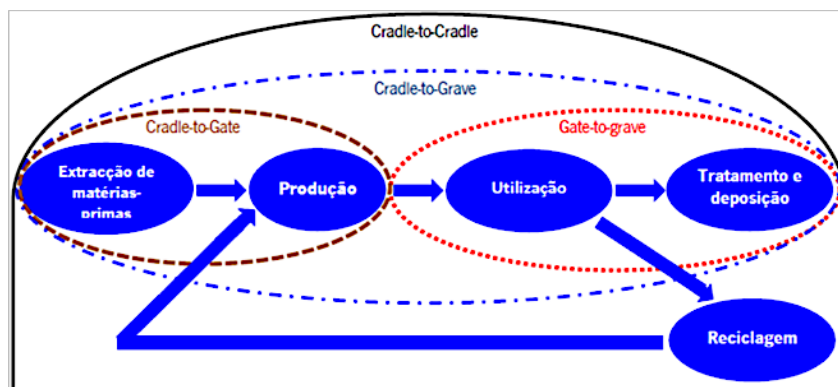


Figura 4- Representação esquemática das variantes da avaliação do ciclo de vida (Mateus, 2009)

3.4. Softwares de análise ACV

Uma vez que os edifícios possuem uma elevada quantidade de dados e informações a serem geridos, as ferramentas de análise ACV servem para facilitar a gestão operacional. Estes softwares conferem uma maior fiabilidade nos cálculos, nas conclusões e nas recomendações

dos estudos (Maia, 2013), assim, quando estes são aplicadas a edifícios podem ser divididos em três níveis (Cabeza *et al.*, 2014):

- **Nível 1**, para ferramentas de comparação de produtos e fontes de informação (BEES 4.0, GaBi 8.7.1 e SimaPro 9.0).
- **Nível 2**, para ferramentas de apoio à decisão, uma vez que avaliam parâmetros relacionados com a energia operacional e os seus efeitos ambientais (EQUERQ, Envest e Athena).
- **Nível 3**, abrange os ciclos completos de construção (BREEAM, CEEQUAL e LEED).

No Anexo C pode-se encontrar mais detalhes sobre os softwares mencionados.

3.5.Dificuldades da aplicação da ACV no sector da construção

Apesar da evolução nos últimos anos, esta metodologia ainda necessita de ser simplificada e melhorada, dado que, a sua aplicação envolve uma recolha minuciosa de dados de todos os materiais, componentes e sistemas construtivos aplicados (Soust-Verdaguer, Llatas and García-Martínez, 2016). Como tal, podem surgir dificuldades na recolha dos mesmos, já que muitas empresas preferem preservar as informações dos produtos. Não obstante, potenciais mudanças na forma e na função do edifício durante a fase de utilização, podem-se traduzir posteriormente em dificuldades na avaliação do seu impacto ambiental (Matos, 2016).

Para além disso, outros aspetos são indicados (Mateus, 2009):

- Complexidade dos edifícios: Os edifícios são constituídos por um conjunto numeroso de materiais, tecnologias e processos, por isso, quando se pretende avaliar o desempenho global do edifício, deve-se considerar o modo como cada uma das unidades se relaciona entre si, com os utilizadores e com o ambiente interno e externo. O que leva a concluir que é difícil considerar todos os aspetos que influenciam o ciclo de vida de um edifício;
- Multidisciplinaridade do ciclo de vida: Desde a extração das matérias primas até ao fim da vida útil, são envolvidos diversos intervenientes que utilizam uma grande

- quantidade de parâmetros quantitativos e qualitativos que se expressam em grandezas diferentes e não se correlacionam entre si;
- Quantidade e diversidade de materiais: os edifícios são constituídos por uma elevada quantidade e diversidade de materiais com impactes muito distintos, por isso, torna-se difícil encontrar bases de dados que contenham o inventário de todos. Como consequência, certos materiais que apresentam elevados impactes ambientais podem não ser contabilizados;
 - Baixo nível de industrialização: Há sempre diferenças entre o edifício concebido e o edifício construído. Esta situação afeta a análise de impactes na fase de operação e na fase de construção;
 - Fase de utilização: Corresponde à fase mais longa e com maiores impactes. A sua durabilidade e o seu desempenho são condicionados por fatores externos e comportamentais dos próprios utilizadores, portanto, é extremamente complicado estimar o desempenho real do edifício na fase de utilização;
 - Incompatibilidade da informação: Ao analisar um produto, pode haver uma variação da informação, o que se traduz numa perda de credibilidade nos resultados (Gervásio, 2013);
 - Diferenças políticas, tecnológicas, culturais e socioeconómicas entre países: Devido às diferenças políticas dos diferentes países, não é possível aplicar a mesma metodologia numa escala global, pois muitas vezes não são adaptáveis à realidade do local onde o edifício em estudo está inserido (Mateus, 2009).

3.6.ACV e a sua aplicabilidade na reabilitação

A ACV é uma metodologia que tem sido usada no setor de construção desde 1990. Com a atual popularização do conceito da construção sustentável, a ACV ganhou importância tornando-se no método mais indicado para avaliar o impacto ambiental das práticas construtivas (Ortiz, Castells e Sonnemann 2009).

No ciclo de vida de um edifício, a fase com maior impacto é a de utilização, portanto, a tendência global é construir edifícios com necessidades energéticas menores, de forma a cumprir os objetivos internacionais de eficiência energética e redução de emissões de gases de efeito de estufa (Vilches, Garcia-Martinez and Sanchez-Montañes, 2017).

A adoção de estratégias passivas é essencial para a redução do consumo energético e da energia incorporada dos materiais, por isso, no processo de reabilitação é necessário que seja incorporada a metodologia da ACV. As ações de reabilitação de uma construção são extremamente complexas, porque, precisam de eliminar as causas das anomalias e de degradação do edificado e melhorar as condições de habitabilidade do edifício durante o seu ciclo de vida. Ao contrário da reabilitação tradicional que só tem três fases (fase de análise e diagnóstico, a fase de projeto e a fase de construção), a reabilitação com base na sustentabilidade apresenta mais duas fases: utilização/manutenção e desconstrução. Portanto, enquanto que a reabilitação tradicional se baseia na resolução dos problemas relacionados com a degradação física do edifício, o tempo e os custos associados, a reabilitação com base na sustentabilidade acrescenta preocupações ambientais e sociais, redução do consumo de recursos e a garantia da saúde e do conforto (Dinis R. 2010).

Capítulo 4

Building Information

Modeling

Capítulo 4. *Building Information Modeling*

4.1 Enquadramento

4.2 Benefícios e riscos na sua aplicação

4.3 Ferramentas do BIM

4.4 Domínios do BIM

Capítulo 4. BUILDING INFORMATION MODELING

4.1. Enquadramento

O BIM é uma metodologia cuja utilização tem vindo a aumentar no setor da construção, tendo sido desenvolvida para auxiliar nas diferentes fases da construção (projeto, construção, manutenção, entre outras), providenciando uma plataforma digital para todos os envolvidos no ciclo de vida do edifício (Pinho, 2013).

Este termo é frequentemente confundido com as ferramentas de modelação comercializadas por empresas de software, porém, o BIM não é um modelo, mas sim um conjunto de processos que se baseia num sistema base de informação que cria valor e inovação a longo prazo. A designação BIM é usada, equivocadamente para caracterizar modelos tridimensionais, que correspondem apenas a linhas representativas de um objeto. Esta ambiguidade, surge do aspeto gráfico das aplicações a que esta metodologia recorre (Martins, 2009; Pina, 2015).

Por meio de um modelo estrutural de informação digital e tridimensional, constam os vários objetos que compõem o edifício, como a forma, o comportamento e a relação paramétrica entre as diversas partes (Pinho, 2013). Por ter a capacidade de detetar erros, o BIM também tem sido incorporado na gestão de segurança da construção e na prevenção de riscos, o que tem contribuído para o aumento da produtividade do trabalho e tem reduzido fatalidades (Ghaffarianhoseini et al. 2017).

Ao contrário dos outros sectores, o sector da construção recorreu a essa tecnologia tardiamente, portanto, é expectável que a sua utilização cresça significativamente nos próximos anos (Ghaffarianhoseini et al. 2016). De facto, a implementação do BIM tem-se expandindo em todo mundo, sendo o Reino Unido, atualmente, o líder mundial, devido às políticas governamentais que exigem, entre outros aspetos, que os projetos de carácter público devam incorporar esta metodologia (Stone, 2018). Por exemplo, em 2012, apenas 39% das empresas no Reino Unido tinham implementado o BIM e hoje, cerca de 60% das empresas utilizam esta metodologia (Tran and Tookey, John E, Robertis, 2012; Waterhouse R. et al., 2017).

4.2. Benefícios e riscos na aplicação

A aplicação desta metodologia apresenta vantagens e desvantagens. As vantagens estão associadas principalmente à interoperabilidade, à gestão de conflitos e ao controlo de custos.

– Interoperabilidade

A interoperabilidade corresponde à capacidade de trocar, gerir e comunicar dados entre diferentes softwares, simultaneamente. Esta surgiu como resposta às dificuldades na transferência de dados entre programas e à ausência de linguagem comum (que se deve à ocultação da codificação própria e privada, de forma a que essa informação não seja acessível a empresas da concorrência) (Pinho, 2013).

Pode ocorrer entre softwares do mesmo fornecedor, de diferentes fornecedores e através de *open data standards*. Neste último pretende-se garantir que a informação de diferentes fontes e diferentes softwares trabalhem em conjunto para melhorar o fluxo de trabalho. Com a crescente quantidade de informação, os problemas de interoperabilidade foram-se intensificando, então, foi necessário criar uma plataforma de partilha que interligasse os diferentes softwares. O modelo com maior destaque é o *Industry Foundation Classes* (IFC), que é um modelo de dados standard que permite trocar e gerir dados durante o ciclo de vida da construção (Pina, 2015). Desde que a informação esteja na base de dados, qualquer alteração realizada é atualizada em tempo real, evitando assim a propagação de erros.

– Gestão de conflitos

Para além da troca de informações entre os vários intervenientes no projeto, o BIM permite a verificação de incompatibilidades entre as diferentes peças e os códigos de construção. Assim, há uma redução significativa na quantidade de erros e omissões, permitindo controlá-las na fase de projeto (Pinho, 2013).

– Controlo de custos

É preferível que seja realizada uma intervenção de compatibilização e coordenação durante a fase de projeto, porque minimiza os atrasos, custos adicionais e pedidos de alteração

durante a fase de construção. Os modelos do BIM permitem a introdução de dados dos diversos componentes, obtendo-se no final, o custo total durante a vida útil do mesmo.

Apesar de ser uma tecnologia cara, diversos estudos têm comprovado o retorno de investimento a curto e a longo prazo (Lee, Park e Won 2012). A curto prazo, o maior benefício é a minimização de erros e a longo prazo é a redução de reclamações e custos associados à resolução de problemas.

Como desvantagem, as maiores dificuldades na adoção do BIM estão relacionadas com (Ghaffarianhoseini et al. 2017):

- Falta de informação dos componentes dos edifícios existentes;
- Custos elevados na implementação e na formação de profissionais;
- Incompatibilidade entre os softwares;
- Cibersegurança;
- Aspetos legais.

A implementação das ferramentas BIM podem levantar algumas questões legais devido à forma como são elaborados os contratos e como o projeto é entregue, porque, surgem muitas vezes questões relacionadas com a propriedade do modelo e os custos inerentes a este (Pina, 2015).

4.3.Ferramentas BIM

Ao longo dos anos notou-se uma evolução no modo como são desenvolvidos os projetos de construção. As ferramentas BIM não só mudaram a forma como os desenhos são criados, como também alteraram o método de elaboração e construção de um edifício, permitindo a junção de várias fases do projeto num único modelo virtual. Através do uso de um software informático é possível aplicar diversas práticas da construção e reajustar possíveis erros atempadamente.

Os modelos virtuais podem ser divididos em duas categorias: modelos de superfície e modelos sólidos. Os primeiros, tal como o nome indica, representam visualmente o edifício baseando-se nas suas dimensões, forma, localização, etc.

Os modelos sólidos, também designados por modelos inteligentes, não se baseiam apenas na simulação gráfica, como também permitem produzir modelos contendo diversos tipos de informação nos objetos (Kymmell, 2008).

4.4.Domínios do BIM

As abordagens do BIM são designadas por domínios. Estes diferem devido à área de trabalho: 3D, 4D, 5D, 6D e 7D. A base de desenvolvimento de um modelo BIM é um modelo 3D. O BIM 3D permite a incorporação de informação importante na execução de um projeto. Tanto o modelo, como as informações nele inseridas, podem ser analisados por qualquer interveniente do projeto. Esta funcionalidade é vantajosa, pois, possibilita o esclarecimento de dúvidas, a obtenção de cortes e plantas de forma automática e permite ter uma maior sensibilidade relativamente ao projeto e ao seu funcionamento (Eastman *et al.*, 2008).

A quarta dimensão é uma ferramenta poderosa de planeamento e análise do fluxo de trabalho. Esta permite conectar o tempo de duração das atividades construtivas com o modelo 3D, para desenvolver um gráfico em tempo real do progresso *versus* tempo (Eastman *et al.*, 2008). Desta forma, os projetos podem ser alterados com o intuito de aumentar a produtividade. Para tal, é necessário que todos os materiais e componentes sejam pré determinados e as suas quantidades calculadas (Ghaffarianhoseini et al. 2017).

À quinta dimensão estão associados os custos. A integração dos custos no sistema de modelação permite criar um orçamento correspondente à vida útil do edifício, através de estimativas e representações financeiras ao longo do tempo (Eastman *et al.*, 2008).

A sexta dimensão assenta numa temática muito atual, a sustentabilidade na construção. Esta permite que, com base nos componentes e materiais integrados no projeto, haja garantias do cumprimento das metas de carbono, através de testes e comparações entre as diferentes opções (Eastman *et al.*, 2008).

A sétima dimensão expande a utilização do modelo para o “*facility management*”, dado que, o modelo global fornece uma descrição completa de todos os elementos da edificação, assim, o BIM 7D é utilizado como uma base de dados para a gestão de ativos (Eastman *et al.*, 2008). Portanto, o BIM permite que os intervenientes do projeto possam prever o seu desempenho ainda na fase de projeto, por meio de análises, simulações e visualizações.



Figura 5- Domínio do BIM (Matos, 2016)

Capítulo 5

Integração da ACV
na metodologia BIM

Capítulo 5. Integração da ACV e do BIM no setor da construção

5.1. Introdução

5.2. ACV no sector da construção

5.2.1. A nível global

5.2.2. Em Portugal

5.3. ACV em soluções estruturais

5.3.1. A nível global

5.3.2. Em Portugal

5.4 Relação entre a ACV e o BIM

Capítulo 5. INTEGRAÇÃO DA ACV E DO BIM NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO

5.1.Introdução

Nos últimos anos, a preocupação com o meio ambiente tem vindo a crescer, pelo que, o conceito da sustentabilidade tem ganho maior destaque no setor da construção.

De acordo com a norma europeia EN 15643-4 (2015), a avaliação da sustentabilidade dos edifícios corresponde à combinação da avaliação do desempenho ambiental, social e económico, tendo em conta os requisitos técnicos e funcionais de um edifício ou de um sistema instalado. A implementação de um edifício sustentável permite reduzir o consumo de recursos naturais e consequentemente, mitigar os impactes ambientais negativos. Estes, tal como foi referido no Capítulo 3, podem ser calculados através de uma metodologia de ACV.

Tendo em conta que o BIM tem uma componente visual e permite que os intervenientes possam prever o desempenho dos materiais e dos seus produtos durante o ciclo de vida de um edifício, é importante perceber de que forma a integração destas duas metodologias pode ajudar a desenvolver edifícios sustentáveis e obter melhores resultados.

Assim, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da metodologia de ACV em edifícios correntes e em soluções estruturais e da integração do BIM-ACV no setor da construção. Estas abordagens serão realizadas a nível global e nacional.

5.2.ACV no sector da construção

O setor da construção é um dos que mais causa impactes ambientais, pois, consome cerca de 40% de recursos naturais e é responsável por 50% das emissões de gases de efeito de estufa (Röck *et al.*, 2018).

A US EIA estima que até 2025 o consumo energético global cresça 33% nos países desenvolvidos e 91% nos países em desenvolvimento (Najjar *et al.*, 2017). Para além disso, a ocupação e uso do solo, o consumo de recursos, nomeadamente, água e energia, a queima de combustíveis fósseis e a grande produção de resíduos têm aumentado a pressão ambiental (Mateus, 2009).

A adoção de estratégias direcionadas a práticas sustentáveis são importantes para reduzir o consumo energético, as emissões de gases de efeito de estufa e os impactes ambientais causados pelos materiais de construção. Por isso, a investigação nessa área é muito importante.

A Scopus é a maior base de dados de artigos científicos. De acordo com as informações disponibilizadas nesta, foram realizados 379 estudos de ACV em edifícios residenciais e 121 estudos em edifícios comerciais desde 2000. A Figura 6 apresenta o número destes estudos realizados entre 2000 e 2019.

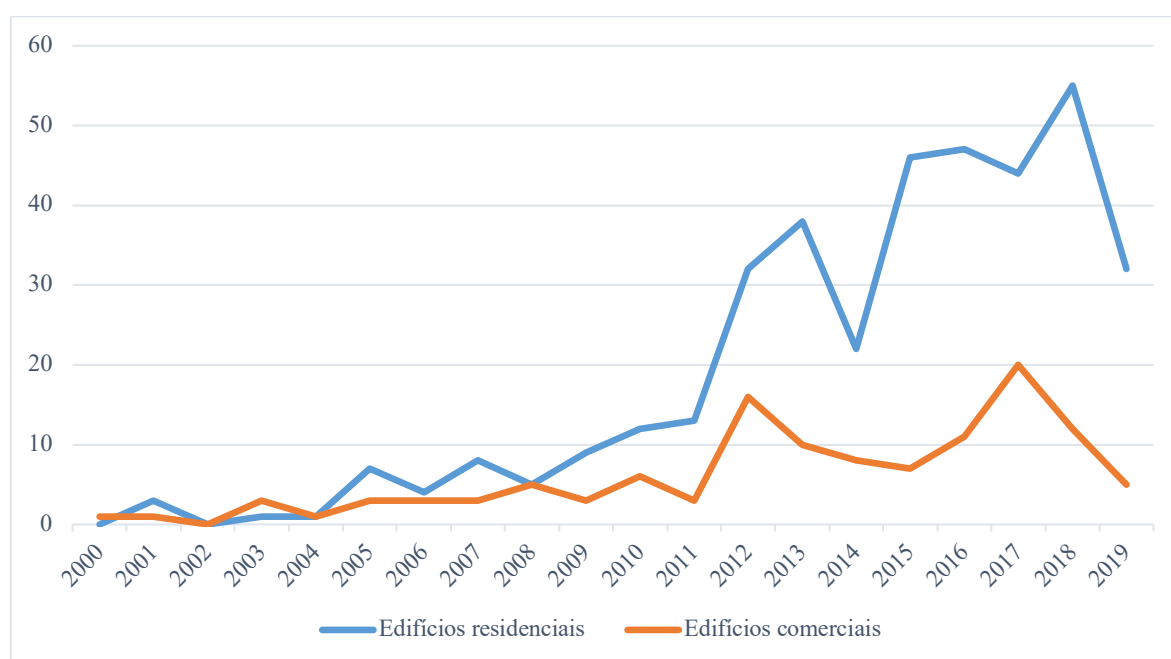


Figura 6 - Estudo do ACV em edifícios residenciais e comerciais entre 2000 e 2019 (Fonte: Scopus)

De igual forma, na Figura 7 e 8 indicam-se quais são os países com maior número de publicações, dos quais se destaca os EUA.

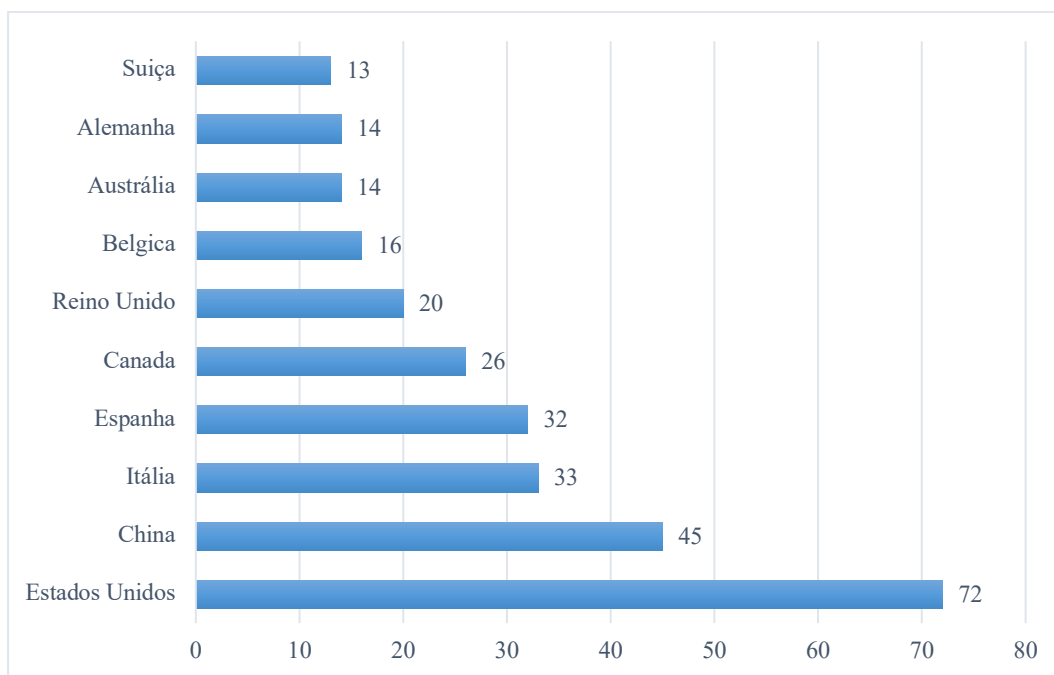


Figura 7 - Estudos de ACV em edifícios residenciais (Fonte: Scopus)

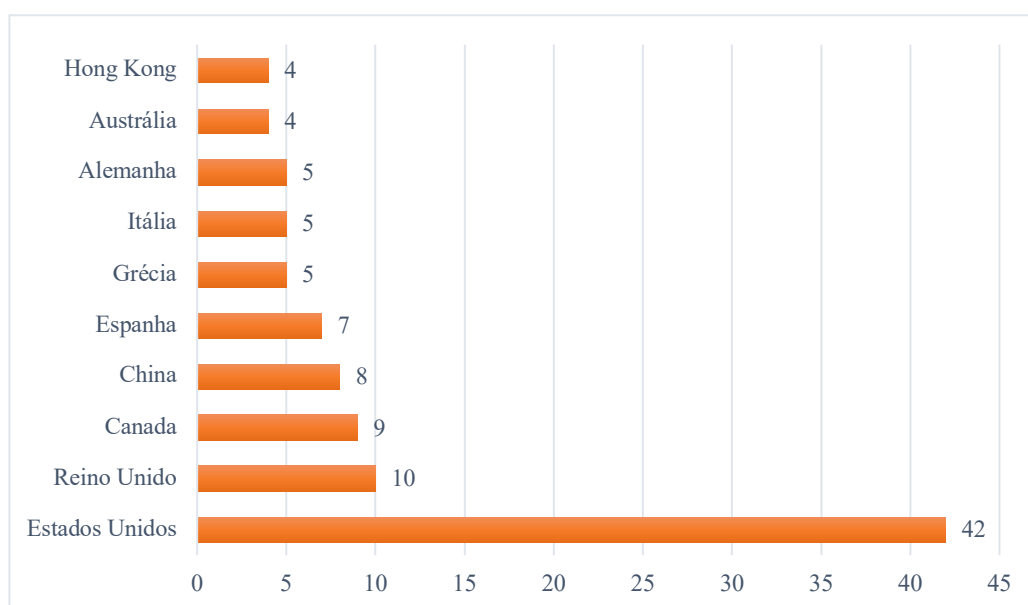


Figura 8 - Estudos de ACV em edifícios comerciais (Fonte: Scopus)

5.2.1. A nível global

A Tabela 1 apresenta alguns exemplos de estudos recentes nos quais foi utilizada a metodologia ACV.

Tabela 1 - Exemplo de estudos ACV em edifícios

Título	Referência
“A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete”	(Zhang <i>et al.</i> , 2019)
“Building Life Cycle applied to refurbishment of a traditional building from Oporto, Portugal”	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2018)
“Comparing environmental burdens, economic costs and thermal resistance of different materials for exterior building walls”	(Prateep Na Talang e Sirivithayapakorn, 2018)
“Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest”	(Pomponi e Moncaster, 2018)
“Critical consideration of buildings environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review”	(Hossain e Ng, 2018)
“Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions”	(Balasbanch e Bin Marsono, 2017)
“Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings”	(Anand e Amor, 2017)
“Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review”	(Vilches, Garcia-Martinez e Sanchez-Montañes, 2017)
“Embodied carbon dioxide assessment in buildings: guidance and gaps”	(Giesekam e Pomponi, 2017)
“Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings”	(Sierra-Pérez <i>et al.</i> , 2016)
“A simplified tool to evaluate the sustainability of buildings in steel in early stages of design”	(Santos, Gervásio e da Silva, 2016)

O número de publicações referentes à ACV tem aumentado todos os anos. A Figura 9 mostra a quantidade de estudos de ACV publicados nos últimos 8 anos. Atualmente, regista-se cerca de 2188 artigos nesta área. Só no 1º semestre de 2019, já foram registadas 179 publicações.

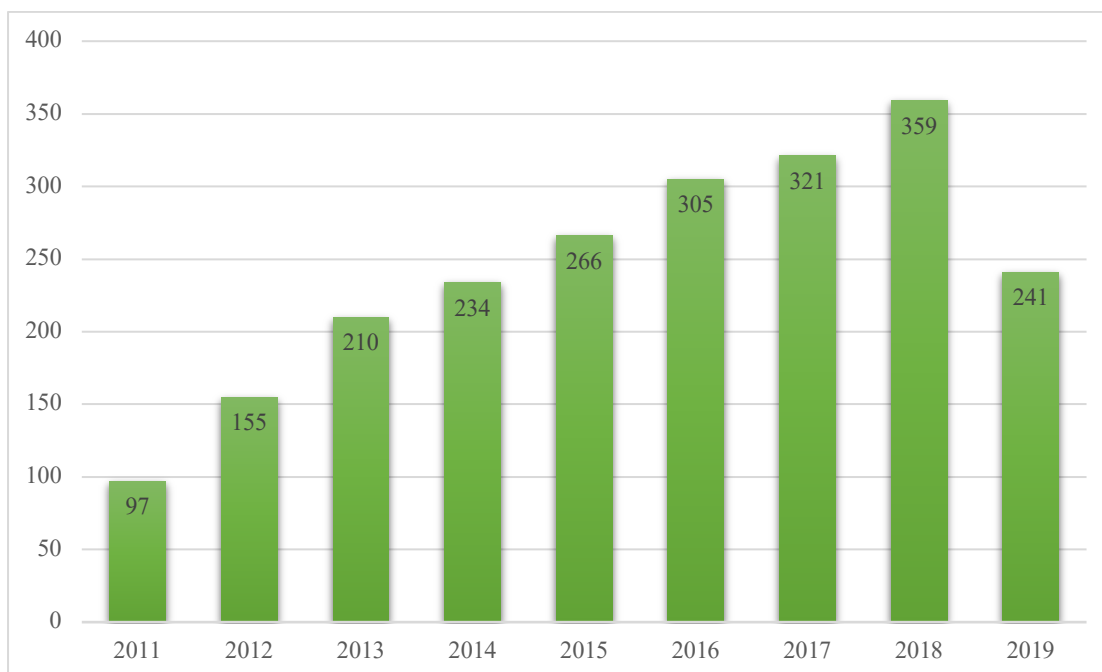


Figura 9-Estudos de ACV publicados entre 2011 e 2019, a nível global (Fonte: Scopus)

Paralelamente à crescente implementação da ACV na construção, tem havido um aumento da exigência de edifícios com menor impacto ambiental. Por isso, estes estudos visam não só apresentar soluções para a redução do consumo energético, como também, para reduzir o consumo de recursos naturais, os impactos ambientais dos materiais (energia incorporada) e consequentemente, os impactos na saúde humana.

A integração da ACV no setor da construção depende essencialmente dos requisitos de cada país. A Figura 10 mostra os países com maior número de publicações de estudos ACV no setor da construção, destacando-se novamente os EUA.

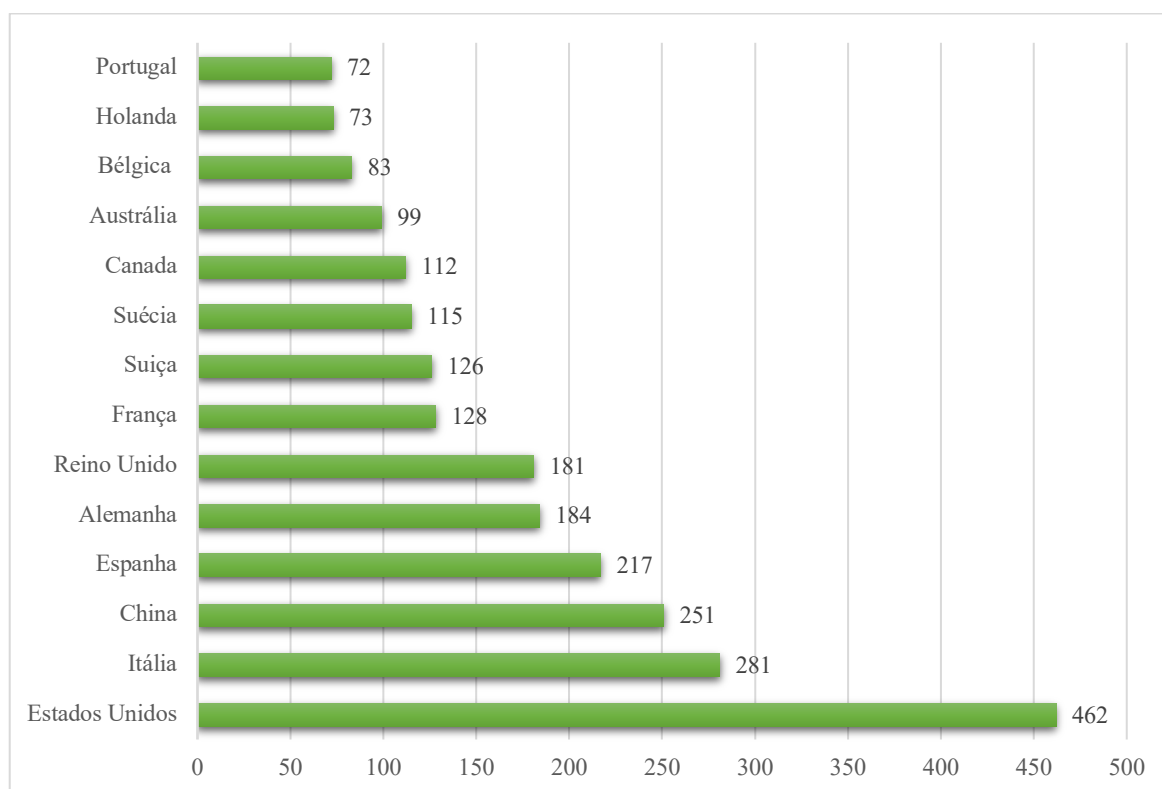


Figura 10-Países com maior número de publicações em ACV (Fonte: Scopus)

O estudo da ACV pode englobar diversas vertentes, por exemplo, Luo et al. (2019) realizaram um estudo comparativo para medir as emissões de gases de efeito de estufa de construções de estacas pré-fabricadas e moldadas *in situ*, utilizando dois casos de estudo na China. Os resultados indicaram que os impactos gerados na execução de estacas moldadas *in situ* são mais reduzidos do que a adoção de estacas pré-fabricadas, pois estas têm um impacto muito elevado durante o transporte. Assim, para que a sua implementação seja viável é necessário reduzir as emissões geradas na produção dos materiais e no transporte até ao local da obra. Os resultados indicam ainda que o uso de materiais reciclados pode permitir a redução das emissões de gases de efeito de estufa em ambos os casos.

A metodologia ACV também é utilizada na seleção de materiais de forma a reduzir os consumos energéticos. Hafner e Schäfer (2018) realizaram diferentes avaliações do ciclo de vida de edifícios residenciais e com base nestas, calcularam a quantidade de gases de efeito de estufa que foram reduzidos ao utilizar a madeira ao invés de um material de origem

mineral. Os resultados mostraram preferência pela construção em madeira, dado que diminui a quantidade de emissões por m² de área bruta.

Os estudos de ACV também têm a capacidade de contribuir na tomada de decisão. Prateep Na Talang e Sirivithayapakorn (2018) compararam os impactes ambientais, a avaliação do custo do ciclo de vida e a resistência térmica de paredes de betão celular autoclavado (BCA) com o de paredes externas de tijolos cerâmicos. Este estudo analisou três cenários para o BCA e três para os tijolos cerâmicos, sendo estes, parede de camada única, parede dupla com caixa de ar e parede dupla com camada de poliestireno expandido. Os resultados revelaram que os impactes ambientais dos três cenários do BCA foram maiores do que os respetivos cenários de paredes de tijolos cerâmicos. De igual modo, os custos das paredes de tijolos (44.39 \$-79.58\$) foram menores do que os custos das parede de BCA (48.95\$-95.66\$). Assim, a parede de tijolos (de camada única) foi considerada a opção mais viável.

Outro exemplo de estudo é apresentado por Hu (2018) que faz uma avaliação dinâmica do ciclo de vida de uma escola primária. Este método difere do convencional dado que permite uma maior flexibilidade espacial e temporal, aumentando a sua aplicabilidade na tomada de decisões. Este documento propõe um modelo para produzir cálculos mais específicos, através da integração do comportamento dos utilizadores ao longo da vida útil do edifício. Os resultados para além de mostrarem uma diferença notável no impacto ambiental de uma ACV convencional e de uma ACV dinâmica, também sugerem que as mudanças de comportamento durante a vida útil de um edifício podem influenciar a sua durabilidade.

Há ainda artigos, que fazem revisões sobre um assunto específico. Na revisão bibliográfica de Vilches, Garcia-Martinez e Sanchez-Montañes (2017) é salientado que a maioria dos estudos de ACV foca-se nos efeitos da renovação energética, ao comparar os impactes ambientais antes e depois do edifício ser reabilitado, ignorando na maioria das vezes, os impactes dos materiais de construção (que poderiam reduzir o consumo energético e as emissões de CO₂). Para além disso, frisam que uma grande parte das pesquisas não consideram os aspetos culturais no estudo de ACV. Assim, publicações como a de Abd Rashid e Yusoff (2015) enfatizam a necessidade de se fazer uma análise *cradle-to-grave/cradle* para determinar as fases e os materiais com maior impacto, com vista a reduzi-

los, e Najjar *et al.* (2017) sugerem a necessidade de integrar a ACV e o BIM, para facilitar no processo de tomada de decisão.

5.2.2. Em Portugal

Em Portugal, o número de estudos referentes ao ACV tem aumentado anualmente, o que demonstra uma crescente importância deste tema entre a comunidade técnica e científica.

A Figura 11 apresenta a evolução do número de publicações de estudos de ACV no setor da construção em Portugal.

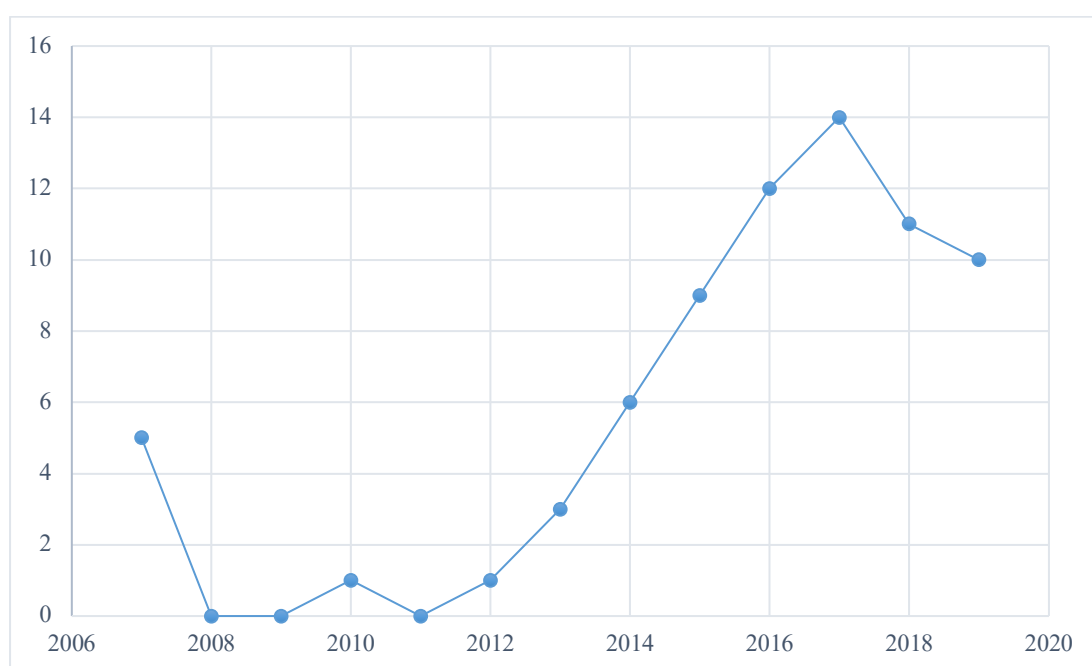


Figura 11-Estudo de ACV em Portugal (Fonte: Scopus)

Apesar do decréscimo em 2018, é expectável que haja um aumento nos anos seguintes devido à crescente preocupação ambiental. De seguida, a apresentam-se alguns exemplos de estudos de ACV mais recentes, em Portugal.

Trabalho desenvolvido por Kurda, de Brito e Silvestre (2019):

Descrição: Este estudo mostra como otimizar o desempenho técnico, os custos e os impactes ambientais, de misturas de betão tradicional e não tradicional. Por isso, são

realizados diversos ensaios contendo diferentes percentagens de agregados de betão reciclados e cinzas voláteis.

Conclusão: Os resultados mostram que independentemente do cenário e da aplicação, em termos de desempenho técnico, custo e de impacto ambiental, as misturas com melhor resultado são aquelas produzidas com a incorporação simultânea de cinzas voláteis e agregados reciclados.

Vantagens: A reutilização de agregados não requer tempo nem consumo de recursos excessivos e a aplicabilidade destas misturas está direcionada para diferentes cenários, tais como: edifícios residenciais sustentáveis, habitações à beira mar, entre outros.

Limitações: É avaliado o desempenho global da mistura, porém, se forem analisadas as características individuais de cada provete, estas podem-se situar abaixo da média.

Trabalho desenvolvido por Rodrigues V. *et al.* (2018):

Descrição: Este trabalho avalia a quantidade de carbono e a energia incorporada num edifício industrial, através da metodologia ACV.

Conclusão: Os resultados mostram que os materiais de construção, em particular, os materiais processados como o aço e o betão, são os que mais contribuem para as emissões de gases de efeito de estufa, dado que o seu processamento envolve um maior consumo energético.

Vantagens: Permite identificar os materiais com maior energia e carbono incorporados.

Limitações: Apesar de mencionar materiais naturais como a pedra e a madeira, não há um estudo comparativo referente a esses materiais de menor impacto.

Trabalho desenvolvido por Brás e Faria (2017):

Descrição: Esta pesquisa pretende mostrar que a escolha das argamassas afeta as ações de manutenção e causa um aumento do carbono incorporado, contribuindo assim, para um aumento do impacto ambiental desta ação.

Conclusão: Este trabalho permite relacionar as ações de manutenção com os impactos ambientais, dado que, quanto mais intervenções forem realizadas, maior será a quantidade de carbono incorporado dos materiais. Por isso, na escolha da argamassa, deve-se ter em

conta que, algumas podem ter um impacto maior no início, porém, este reduz-se ao longo da vida útil do edifício.

Vantagens: Este estudo demonstra que as argamassas de cimento apresentam melhor desempenho quando comparadas com as argamassas à base de cal hidráulica natural.

Recomendações: É necessário desenvolver mais trabalhos referentes a este tema para que seja possível efetuar mais comparações.

Trabalho desenvolvido por Rodrigues e Freire (2017):

Descrição: Este trabalho integra a ACV e o CCV numa simulação térmica, para avaliar estratégias de isolamento de coberturas e paredes exteriores aplicadas num edifício histórico em Coimbra. Este pretende determinar de que forma a ocupação influencia o desempenho ambiental e económico de um edifício. Para tal, foi realizada uma análise de diversos cenários, sendo dois de baixa e alta ocupação de um edifício residencial e outro de utilização de um escritório.

Conclusão: A avaliação de impacto do ciclo de vida mostra que o cenário do escritório apresenta menor impacto total, seguido do edifício com baixa ocupação residencial e do edifício com alta ocupação residencial.

Vantagens: Enfatiza a necessidade de adotar mais estratégias *retrofit* com vista a maximizar a economia e minimizar os impactos ambientais. As informações e recomendações podem ser utilizadas em prédios e edifícios com condições climáticas similares.

Recomendações: São necessárias mais pesquisas para estudar outros materiais que influenciam os impactos ambientais e económicos.

Trabalho desenvolvido por Demertzi *et al.* (2017):

Descrição: Através da metodologia ACV, foi aplicada uma abordagem *cradle-to-gate*, com o propósito de estudar os impactos ambientais associados à produção de placas e granulados de cortiça expandida utilizados num isolamento. Pretende-se avaliar quais são as etapas e os processos com maior impacto.

Conclusão: Os resultados mostram que o processo com maior impacto ambiental é o de cozimento (em caldeira). O presente estudo também mostra a importância da integração do carbono biogénico na avaliação ambiental de produtos de base florestal.

Vantagens: Os estudos de ACV anteriores, relativos aos produtos de cortiça, não incluem carbono biogénico nos cálculos. Assim, ao considerar este gás, notou-se uma diferença significativa entre o impacto ambiental entre os dois produtos, o que prova que a contabilização do carbono biogénico deve ser efetuada.

Recomendações: Posteriormente, deve-se focar na redução da energia consumida na produção dos granulados de cortiça expandida. Para além disso, é necessário estabelecer uma metodologia comum para facilitar a comparação do impacto ambiental dos produtos de cortiça.

Trabalho desenvolvido por Monteiro, Fernández e Freire (2016):

Descrição: Este artigo compara o ciclo de vida da energia primária de uma construção nova em Coimbra e de uma construção existente.

Conclusão: Os resultados mostram que as construções novas podem reduzir significativamente o consumo de energia primária, porém, é necessário ter especial atenção à fase operacional e à energia incorporada dos componentes.

Vantagens: A energia estimada para o conforto térmico, utilizada na fase operacional, é menor do que a energia incorporada nos materiais, por isso, este estudo reforça a importância da análise dos impactos dos componentes construtivos na fase de projeto.

Limitações: Não incluiu tendências futuras de geração de eletricidade, que, apesar de não ser uma prática comum, pode influenciar os resultados obtidos. Para além disso, a orientação do edifício, a forma e o tamanho das janelas não foram considerados.

Assim, uma vez que não existe uma base de dados destinada para Portugal, é necessário uma investigação mais aprofundada de forma a garantir resultados mais fidedignos.

Trabalho desenvolvido por Brás e Gomes (2015):

Descrição: Neste trabalho utilizou-se uma abordagem *cradle-to-gate* para comparar os impactos ambientais de argamassas tradicionais de cimento e cal hidráulica com

argamassas não convencionais (com granulados de cortiça). O caso de estudo foi uma escola na Baixa da Banheira, em Setúbal, Portugal, que apresentava problemas de condensações e transferência de calor.

Conclusão: O uso de argamassas com cortiça leva a uma redução das emissões de CO₂ de até 30% e a 20% de redução da energia incorporada quando comparadas a argamassas tradicionais de cimento ou de cal hidráulica. A adição destes materiais não compromete o comportamento da argamassa. Quanto maior a vida útil, menor será o impacto da energia incorporada. Durante os primeiros 20 anos de vida útil das argamassas, elas contribuem significativamente para o aquecimento global, porém, no período seguinte o impacto das argamassas torna-se menos relevante.

Vantagens: Analisa e compara os impactos ambientais das atividades humanas e os seus efeitos no consumo de energia, para diferentes períodos de vida útil das argamassas.

Limitações: O estudo considera apenas a energia que é consumida na fase operacional, ignorando fases relacionadas com a construção e o transporte dos componentes.

A maioria dos estudos de ACV no sector da construção em Portugal, analisa os impactos ambientais, a redução de custos e o desempenho térmico de isolamentos. Por isso, é necessário efetuar mais pesquisas e estudos sobre os materiais de construção e os seus impactos ambientais. De facto, a melhoria do desempenho ambiental de um edifício não se resume somente à obtenção de uma maior eficiência energética, também é necessário analisar as características do material de construção de forma a reduzir a energia incorporada.

5.3.ACV em soluções estruturais

A indústria da construção tem um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, dado que é um dos maiores responsáveis pelas emissões de gases de efeito de estufa (Müller *et al.*, 2013; Gieseke J., 2016). Assim, os impactos ambientais dos edifícios podem ser distinguidos de duas formas: (1) devido ao funcionamento do edifício, ou seja, durante a fase operacional (iluminação, aquecimento, arrefecimento, entre outros) e (2) aquando da construção/demolição do edifício (extração de materiais, transporte, montagem, deposição de resíduos, entre outros), designando-se assim de energia incorporada (Pomponi e Moncaster, 2018).

Os materiais de construção contribuem para uma parte considerável dos impactos ambientais negativos. Por exemplo, ao analisar a contribuição dos materiais de construção para emissão de CO₂ de uma estrutura de betão armado, verifica-se que na fase de produção, o betão pronto contribui para a geração de 41% das emissões, seguido do cimento (18%) e do aço para o reforço (17%) (Kumanayake e Luo, 2018).

As pesquisas recentes têm-se focado na minimização do consumo de energia e emissões de gases de efeito de estufa durante a fase operacional do edifício, ignorando outras etapas igualmente importantes (Dylewski e Adamczyk, 2016; Ji *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2017). Por isso, é necessário efetuar pesquisas de modo a adotar soluções estruturais mais sustentáveis e a reduzir os seus impactos ambientais (Eleftheriadis, Mumovic e Greening, 2017).

5.3.1. A nível global

O estudo de ACV pode assentar sobre diversas vertentes.

Sharma *et al.* (2011) concluíram que o betão e o aço são os materiais com maior impacto ambiental. De igual modo, o artigo de Zhang e Su (2007) efetua uma comparação entre os dois elementos e concluiu que o edifício em aço é responsável por uma maior quantidade de emissões de gases e consumo de energia do que o edifício em betão.

A ACV ajuda a encontrar materiais e alternativas mais sustentáveis (Dinis Silvestre, de Brito e Duarte Pinherio, 2013). De facto, um dos objetivos do estudo de ACV é detetar as fases e os materiais com maior impacto. Blengini e Garbarino (2010) afirmam que uma fase pode influenciar as demais, especialmente em edifícios de baixa energia, onde ao reduzir os impactos relacionados com a fase de utilização, aumenta-se a energia incorporada do edifício. Hoxha *et al.* (2017) seguem a mesma linha de pensamento ao analisar o impacto ambiental de materiais de construção de 15 moradias unifamiliares e 15 edifícios multifamiliares e concluir que os materiais de edificações podem contribuir para o aquecimento global tanto quanto algumas ações na fase de utilização. Por isso, Hoxha *et al.* (2017) criticam o facto de muitos estudos focarem-se apenas na fase de exploração. Este artigo também destaca que a incerteza nos dados pode afetar os resultados finais da ACV.

Os estudos de ACV também comparam os impactes ambientais de materiais tradicionais e os não convencionais. A pesquisa realizada por Galan-Marin, Rivera-Gomez e Garcia-Martinez (2016) afirma que os materiais estruturais convencionais como o betão armado, blocos cerâmicos e blocos de betão representam mais de 50% da energia incorporada no edifício. Por isso, é importante recorrer a materiais mais sustentáveis, pois podem economizar 20% da energia acumulada durante o ciclo de vida do edifício. De acordo com os resultados obtidos, cerca de três residências de tijolos de terra compactada podem ser construídas com a mesma quantidade de emissões de CO₂ e energia acumulada de duas casas construídas com blocos cerâmicos. Para além disso, Galan-Marin, Rivera-Gomez e Garcia-Martinez (2016) salientam que a reciclagem de materiais de construção é crucial na redução de energia incorporada no edifício. Por exemplo, o uso de aço reciclado e alumínio economiza mais de 50% da energia incorporada.

Vitale *et al.* (2018) também analisam os impactes ambientais de duas soluções estruturais: uma estrutura convencional de betão armado com paredes de tijolo de alvenaria e uma estrutura de aço moldado a frio com painéis de revestimento e isolamento. Ao analisar os resultados de cada uma das fases do ciclo de vida do edifício nota-se que a estrutura de aço moldado a frio tem mais vantagens em relação à estrutura de betão, uma vez que: apresenta menores consumos energéticos, permite a recuperação de grande parte dos painéis e dos seus componentes (pois permite a sua reutilização imediata, sem haver necessidade de ser reciclado ou descartado) e tem um menor custo associado.

Outros estudos enfatizam a necessidade de adotar políticas que não prejudiquem o meio ambiente e realçam a importância da seleção de materiais aquando na fase de projeto.

Upton *et al.* (2008) após uma revisão bibliográfica, concluíram que geralmente, os edifícios em madeira têm menor energia incorporada e emissões de CO₂ associadas quando comparadas a estruturas de betão, aço e tijolo.

Guardigli, Monari e Bragadin (2011) mostram que, de facto, o impacto ambiental estimado dos edifícios de madeira é menor do que o de um edifício de betão, porém, o uso excessivo deste recurso pode ameaçar o ecossistema.

Asdrubali *et al.* (2017) tiram as mesmas conclusões salientando que, apesar da madeira ser um material reciclável, reutilizável, renovável e apresentar um bom desempenho térmico, acústico e sísmico, a utilização sustentável deste material depende de questões como: gestão

florestal adequada, métodos de fabricação e montagem no local, da distância e dos elementos/materiais de montagem auxiliares. Portanto, é necessário adotar uma política inteligente de forma a permitir que haja uma compatibilidade entre a regeneração do ambiente e os requisitos da indústria de construção.

Por isso, caso se queira melhorar a eficiência do edifício, é recomendado que se use a ACV para prever os impactos ambientais dos materiais de construção, ainda na fase de projeto.

5.3.2. Em Portugal

Em Portugal há poucas pesquisas relativas à ACV em soluções estruturais, dado que a maioria concentra-se em aumentar a eficiência dos isolamentos térmicos e minimizar o consumo energético na fase de exploração do edifício. Ainda assim, há alguns estudos que podem ser analisados:

Ferreira, Duarte Pinheiro e de Brito (2015) realizaram uma análise de ACV e CCV em dois casos de estudo: o primeiro corresponde à reabilitação de um prédio existente em Lisboa e o segundo corresponde à demolição e construção de um prédio novo equivalente, usando uma solução idêntica de betão armado com paredes de tijolo. Os resultados mostraram que a demolição e construção de um novo prédio produzem mais 13% de dióxido de carbono, quando comparados com o cenário de reabilitação. De igual modo, a reabilitação economiza até 10% da energia primária em comparação com a outra solução. Além disso, a reabilitação economiza cerca de 542% na produção de resíduos e 266% na eutrofização (isto porque as paredes estruturais de alvenaria do edifício antigo são espessas). A grande desvantagem da reabilitação é o custo e o impacto ambiental do uso de aço estrutural no reforço sísmico da estrutura.

Gaspar e Santos (2015) realizaram uma avaliação da relação custo-benefício de duas estratégias de intervenção numa casa unifamiliar com 40 anos, em Portugal. Pretendia-se assim, avaliar o impacto ambiental da substituição integral da estrutura existente por uma casa nova e a demolição e reforma parcial de uma casa existente. Como o custo de intervenção era similar, o critério de decisão foi o impacto ambiental. Os autores concluíram que a demolição e reforma parcial é uma estratégia mais sustentável do que a substituição

integral da estrutura existente por uma casa nova, uma vez que consome menos energia, recursos e gera menos resíduos. Portanto, a casa foi renovada apenas com demolições parciais e uma grande remodelação interna.

Samani *et al.* (2015) fazem uma comparação entre um painel sandwich estrutural para uma habitação pré-fabricada, com um edifício de alvenaria de tijolos. Foram estudadas as propriedades mecânicas, térmicas, acústicas, de segurança contra incêndios, custos e impactos ambientais.

Os resultados mostraram que o painel sandwich tem menos 60% de emissões de CO₂, menos 89% de impactos na depleção de recursos e menos 55% de impactos em relação à saúde humana. Relativamente às categorias de impacto, apenas a depleção do ozono é superior, isto porque o painel contém uma camada de poliestireno extrudido, que é composta por substâncias como o clorofluorcarboneto.

Manso *et al.* (2018) avaliam o impacto ambiental do sistema “Geogreen”. Trata-se de um sistema modular de elementos pré-fabricados com vegetação, adequado para os novos edifícios e para edifícios existentes que foram reabilitados. Esta solução baseia-se no desenvolvimento de um sistema de paredes “vivas” que incorpora materiais residuais industriais. Cada módulo é composto por 50% de resíduos industriais, 40% de resíduos resultantes da atividade mineira e 7% de resíduos de vidro. Este estudo demonstra que as fachadas verdes podem-se tornar em soluções mais atrativas ao incorporar materiais reciclados ou resíduos industriais, de forma a diminuir o impacto ambiental.

Estanqueiro *et al.* (2018) analisaram a ACV da produção de agregados naturais e de agregados reciclados para incorporação no betão e constataram que a utilização de agregados reciclados na produção pode reduzir em mais de 23% os impactos ambientais relativamente ao uso de agregados naturais. Se o ciclo de vida dos agregados reciclados incluírem apenas as etapas após o processamento na central de reciclagem, a vantagem é de pelo menos 37,3%. Porém, é necessário analisar também as distâncias de transporte entre o aterro, a pedreira, o local de obra e a fábrica de betão, de forma a saber que cenário é mais vantajoso.

Santos, Gervásio e da Silva (2016) ajudaram na criação de uma ferramenta para alcançar projetos de aço mais sustentáveis, com base na análise energética, cálculos de ACV e análise da zona climática. Eles focaram-se nas estruturas de aço porque as características térmicas

deste material permitem alcançar ganhos e perdas de calor muito elevados. Para além disso, o aço quando reciclado reduz significativamente os impactos ambientais. Os autores concluíram que esta ferramenta poderia ajudar na escolha de soluções estruturais mais sustentáveis e obter uma economia de até 60% de energia.

A partir da análise dos estudos citados, conclui-se que os materiais com maior impacto ambiental são o betão e o aço. Sendo que são os materiais mais utilizados no setor da construção, há necessidade de se efetuar mais pesquisas a fim de encontrar opções mais sustentáveis.

5.4.Relação entre o ACV e o BIM

A ACV tem-se destacado na comunidade científica por ser considerada uma metodologia completa para avaliar a sustentabilidade de um edifício ao longo do seu ciclo de vida (Asdrubali, Baldassarri e Fthenakis, 2013). Devido à sua complexidade e à falta de conhecimento, atualmente, vários estudos sublinham a importância de melhorar e simplificar a aplicação da ACV, por isso, sugere-se a sua integração com a metodologia BIM (Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez, 2016).

De facto, o ambiente e a metodologia do BIM conferem um enorme potencial na aplicação da metodologia ACV, dado que ambas permitem alcançar uma maior eficiência e resiliência na construção (Motuziene *et al.*, 2016). Quando o BIM e a ACV estão integrados no mesmo ambiente, é possível avaliar todas as soluções alternativas e corrigir eventuais erros na fase inicial do projeto, aumentando a capacidade de alcançar um resultado mais económico e com um desempenho ambiental favorável (Dowsett and Harty, 2013). A Figura 12 indica o crescimento de estudos referentes à integração da metodologia ACV com o BIM, entre 2005 e o 1º semestre de 2019.

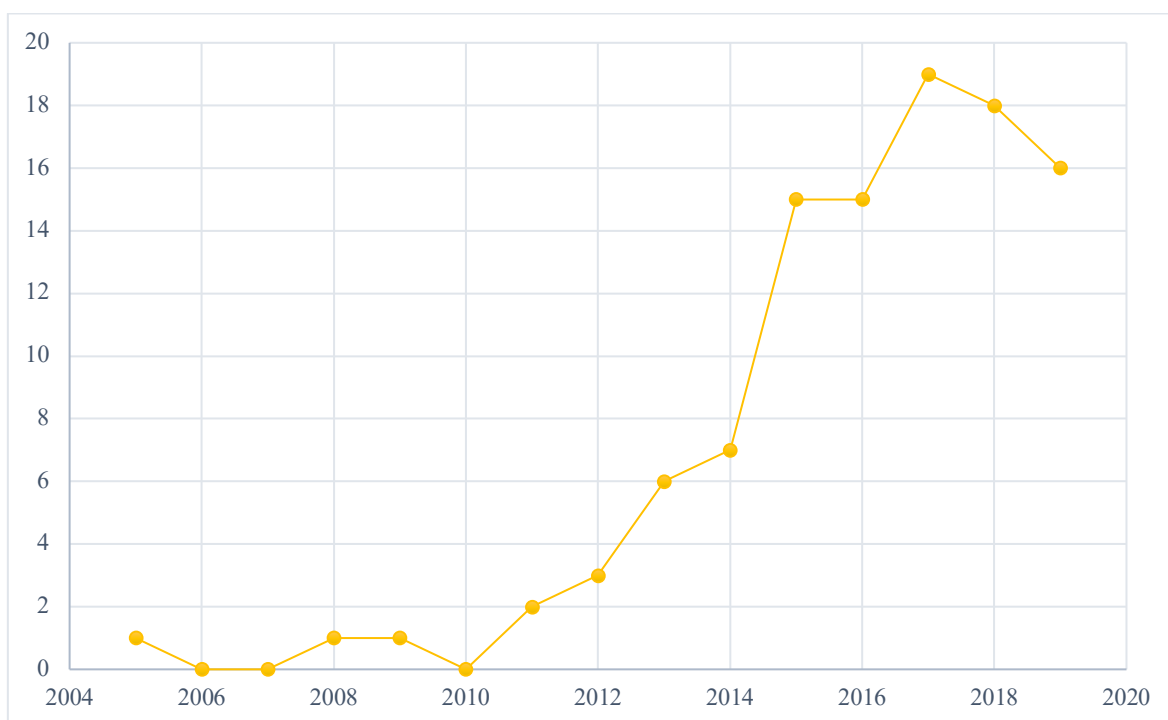


Figura 12-Estudos BIM-ACV a nível global (Fonte: Scopus)

Sendo que os países com maior número de publicações são a China, os Estados Unidos e o Reino Unido, conforme se indica na Figura 13.

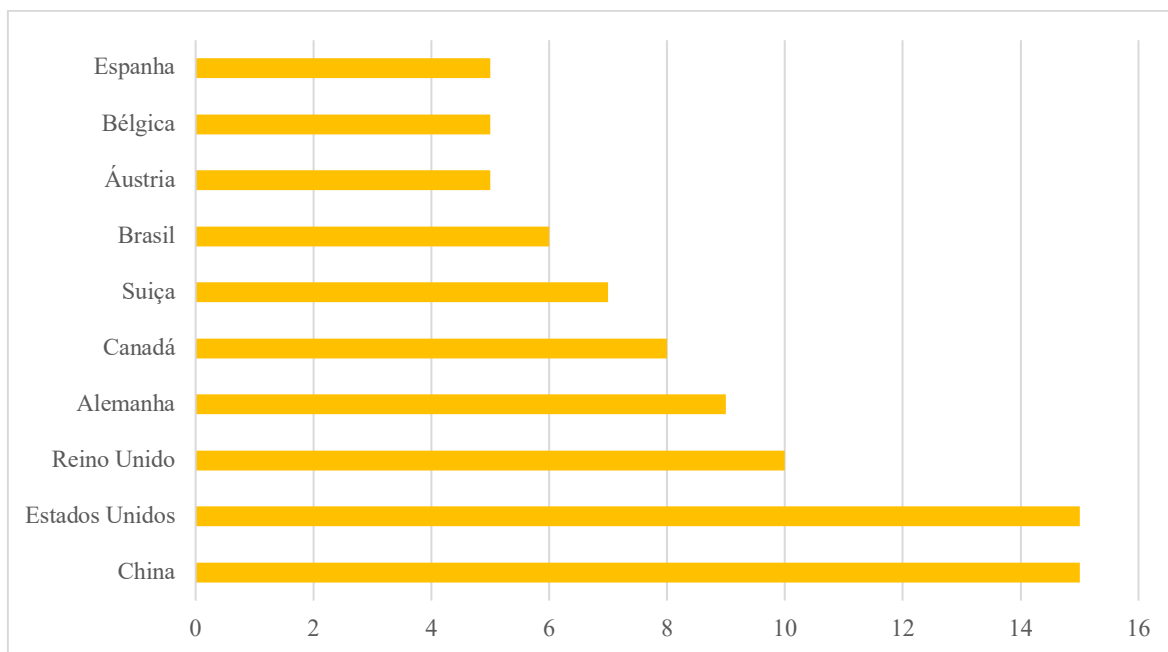


Figura 13- Países com maior número de publicações em estudos BIM-ACV (Fonte: Scopus)

De seguida, apresentam-se alguns exemplos de estudos importantes sobre BIM-ACV.

Trabalho desenvolvido por Najjar *et al.* (2017):

Descrição: Este trabalho pretende ilustrar de que forma a integração do BIM com a ACV na fase inicial do projeto, pode auxiliar na redução dos impactos dos materiais de construção. Para alcançar os objetivos, o caso de estudo baseia-se nas normas ISO 14040 e 14044 e utiliza o programa Autodesk Revit, o Green Building Studio e o Tally.

Conclusão: Este artigo destacou alguns pontos críticos como o alto impacto dos materiais de construção nas fases de produção e operação. Por isso, o uso do BIM na fase inicial de projeto fortalece a tomada de decisão, permitindo alcançar padrões mais eficientes, económicos e sustentáveis.

Vantagens: Os autores incentivam a análise da ACV dos materiais de construção, de forma a reduzir os impactos ambientais negativos. Em termos energéticos, aconselham o uso de sistemas de energias renováveis, a fim de reduzir o consumo de energia e proteger o meio ambiente.

Recomendações: É aconselhada a utilização de uma gama mais ampla de materiais de construção, a fim de comparar os diferentes produtos.

Trabalho desenvolvido por Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez (2017):

Descrição: Este artigo faz uma revisão bibliográfica de estudos recentes centrados em ACV e BIM e analisa de que forma o BIM pode contribuir para a simplificação da entrada e saída de dados. Os artigos revistos correspondem a estudos que aplicam o ACV e calculam as emissões de CO₂ durante as fases iniciais do projeto.

Conclusão: Os resultados mostram viabilidade no desenvolvimento de métodos para organizar informações em modelos BIM, de forma a estimar os impactos ambientais e o consumo energético.

Vantagens: Permite a interação entre modelos e plug-ins e a integração de processos automatizados que combinam diferentes dados e softwares.

Recomendações: Ainda há um longo percurso antecedente à troca automática entre a aplicação BIM e ACV durante os estágios iniciais do projeto. Este artigo também

evidencia que há limitações no BIM referentes à modelação de processos temporais como a utilização, reabilitação, manutenção e deposição , bem como, o potencial de reciclagem e reutilização.

Trabalho desenvolvido por Lu *et al.* (2017):

Descrição: Este estudo fornece uma reflexão crítica sobre a relação entre o BIM e os edifícios verdes, diversas vezes designada por “Green BIM Triangle”. Assim, os autores ilustram três dimensões: (1) as aplicações do BIM na fase de projeto, construção, operação e manutenção de edifícios verdes, (2) as funções do BIM na análise energética, emissões de gases e ventilação no edifício e (3) as aplicações do BIM no apoio às avaliações de construções sustentáveis. Para tal, são avaliados 13 tipos de ferramentas BIM.

Conclusão: A taxonomia proposta fornece uma abordagem que visa conciliar o BIM e os edifícios verdes e permite que os pesquisadores a possam utilizar como guia para encontrar alternativas viáveis.

Vantagens: Este documento fornece orientações para os profissionais da área com o intuito de conciliar o desenvolvimento do BIM com o desenvolvimento de edifícios verdes.

Limitações: São identificadas 6 lacunas, nomeadamente: fraca interoperabilidade, falta de suporte nas fases de construção e operação, falta de padrões entre as diversas áreas de aplicação do BIM, baixa aceitação industrial, baixa precisão de modelos e falta de métodos apropriados de entrega do projeto.

Trabalho desenvolvido por Santos *et al.* (2019):

Descrição: Os autores pretendem avaliar o potencial do BIM como repositório de dados para uma avaliação do ciclo de vida e para o custo do ciclo de vida. Por isso, foi implementada uma estrutura BIM-ACV/CCV de forma a integrar e trocar informações dentro de um ambiente BIM.

Conclusão: Se os fabricantes incluíssem informações ambientais e económicas no catálogo digital dos seus produtos, poderia ser feita uma análise simplificada ACV/CCV automaticamente.

Vantagens: O trabalho contribui para o desenvolvimento de uma estrutura BIM-ACV/CCV.

Limitações: É necessário um número considerável de propriedades para se elaborar uma análise abrangente dos dois métodos.

Trabalho desenvolvido por Ghaffarianhoseini *et al.* (2017):

Descrição: Este artigo pretende examinar o nível de aceitação do BIM, seus benefícios, riscos associados e recomendações para um desenvolvimento futuro.

Conclusão: O BIM tem sido cada vez mais adotado na indústria AEC, desde a sua criação, porém a sua implementação tem sido lenta.

Vantagens: O artigo destaca os potenciais e os desafios e fornece recomendações futuras para a adoção do BIM.

Limitações: O estudo conclui afirmando que as maiores barreiras para a baixa adoção são a ausência de procura/exigência, os custos e os problemas de interoperabilidade entre os softwares. Para além disso, muitos intervenientes têm um baixo retorno relativamente ao investimento, por isso, as pequenas empresas tendem a oferecer uma maior resistência à implementação, porque têm menos projetos e o sucesso do BIM requer um investimento significativo.

Trabalho desenvolvido por Volk, Stengel e Schultmann (2014):

Descrição: Este artigo analisa a implementação do BIM em edifícios existentes, com foco nas fases de manutenção e desconstrução do edifício.

Conclusão: Os resultados mostram a ausência da implementação do BIM em edifícios existentes devido às dificuldades em converter os dados do edifício num objeto BIM, atualizar as informações e lidar com a incerteza nos dados e objetos.

Vantagens: É realizada uma revisão bibliográfica a mais de 180 publicações.

Limitações: Há um grande número de cenários de manutenção no BIM, porém, para a fase de desconstrução, esses números são bem mais reduzidos. Para além disso, os autores concluem que apesar do aumento da utilização do BIM, a implementação em edifícios existentes ainda é limitada.

Trabalho desenvolvido por Jalaei, Zoghi e Khoshand (2019):

Descrição: Esta pesquisa visa apresentar uma metodologia para quantificar o total de resíduos produzidos durante o ciclo de vida do edifício. São expostas as principais razões e propostas algumas soluções que levam à redução dos mesmos.

Conclusão: Os resultados mostram que o BIM pode ajudar na redução dos resíduos em toda a vida útil do edifício.

Vantagens: É estudado um caso real de modo a ilustrar a utilidade e as capacidades das abordagens desenvolvidas. Um dos pontos inovadores desta pesquisa é a aplicação de métodos para reduzir o desperdício durante a vida útil.

Recomendações: Esta pesquisa pode ser desenvolvida de forma a simular o processo de geração de resíduos, especialmente na fase de desconstrução.

Trabalho desenvolvido por Wong e Zhou (2015) :

Descrição: Os autores realizaram uma revisão bibliográfica de 84 artigos e indicaram: (1) como melhorar o desempenho ambiental de um edifício e (2) as técnicas utilizadas para integrar o BIM e a ACV.

Conclusão: Constatou-se que a maior parte das pesquisas concentra-se no desempenho ambiental do edifício e nas fases de construção. Portanto, é necessário efetuar mais estudos sobre a gestão do desempenho ambiental durante as fases de manutenção e demolição.

Vantagens: Descrevem as direções mais importantes para pesquisas futuras.

Limitações: As deficiências detetadas referem-se à falta de ferramentas de simulação “*cradle to grave*” e à falta de pesquisas nas fases de manutenção, reabilitação e demolição do edifício. Sugere-se que as ferramentas futuras incluam o conceito de reduzir, reutilizar e reciclar, nos projetos.

Após uma pesquisa bibliográfica, concluiu-se que: a implementação do BIM tem sido maior nos projetos de construções novas e que uma parte significativa das pesquisas efetuadas estão maioritariamente direcionadas para a fase operacional do edifício. Assim, diversos autores como, Meex *et al.* (2018) salientam a necessidade de se integrar a metodologia BIM-ACV ainda na fase inicial do projeto, de forma a apoiar ou otimizar as decisões. O aumento de

pesquisas no domínio da integração da ACV na tecnologia BIM, pode facilitar no desenvolvimento de bancos de dados e de ferramentas que permitam a interoperabilidade entre o BIM e a ACV.

Em Portugal ainda se verifica uma elevada resistência relativamente à aplicação do BIM, pois os custos de implementação e formação de profissionais são elevados, porém, é expectável que esse cenário mude (Bragança e Mateus, 2012).

Capítulo 6

Caso de estudo

Capítulo 6. Caso de estudo

6.1. Introdução

6.2. Caracterização do edifício e do local de obra

6.2.1 Pavilhão Industrial novo

6.2.2 Pavilhão Industrial existente

6.3. Metodologia

6.3.1. Tally

6.3.2 Cálculo da ACV

6.3.2.1. Definição do âmbito e do objetivo

6.3.2.1.1. Módulos de avaliação e limitações

6.3.2.2. Inventário

6.3.2.2.1. Pavilhão Industrial novo

6.3.2.2.2. Pavilhão Industrial existente

6.3.2.3. Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida

6.3.3. Cálculo do CCV

6.3.3.1. Custo de construção

6.3.3.2. Custo de demolição

6.3.3.3. Custo de reforço sísmico

Capítulo 6. CASO DE ESTUDO

6.1.Introdução

O capítulo anterior realçou a importância da cooperação do BIM com a metodologia ACV. Observou-se ainda, que apesar de ter havido um aumento na quantidade de estudos da ACV em Portugal, a grande maioria foca-se apenas no isolamento térmico dos edifícios, por isso, há necessidade de se aprofundar em outras áreas, a fim de se optar por alternativas mais sustentáveis.

Esta dissertação pretende contribuir na escolha de soluções construtivas, através da avaliação do impacto ambiental e do custo de ciclo de vida de elementos estruturais de dois pavilhões distintos, o primeiro construído em 1990 e o segundo correspondente a uma construção nova (2020). Para o cálculo dos impactos ambientais será utilizada a ferramenta Tally e para o cálculo dos custos imputáveis será utilizado a ferramenta CYPE e a biblioteca da Orçamentos e Orçamentação na Construção Civil (OCCC).

6.2.Caracterização do edifício e do local de obra

O presente caso de estudo visa avaliar os impactos ambientais e os custos associados da (1) construção e demolição de elementos estruturais pré-fabricados de um pavilhão industrial novo para um período de vida útil de 50 anos e (2) do reforço sísmico e demolição de um pavilhão industrial existente para um período de vida útil de 20 anos.

Estas análises irão de acordo com as normas portuguesas que estipulam que o período de vida útil de um edifício é de 50 anos .

6.2.1. Pavilhão industrial novo

O edifício em estudo corresponde a um caso real de um pavilhão de 1 piso, que está localizado em Santa Maria da Feira, Aveiro. Tem uma área bruta total de construção de 34614.42 m² e trata-se de uma estrutura formada por vigas, pilares, muros e painéis pré-fabricados, em betão armado e betão pré-esforçado.

A estrutura de cobertura é constituída por vigas de secção variável com 35m de comprimento (VSV), por vigas caleira (VC) e por vigas retangulares (VR), ambas com aproximadamente 12m de comprimento.

Todas as vigas da estrutura assentam sobre os cachorros ou sobre a cabeça dos pilares e encontram-se ligadas a estes elementos através de varões de aço A500 ou de varões roscados da classe 8.8 que emergem do interior dos pilares.

Para permitir a sua montagem, todas as vigas contêm furos, o que facilita o atravessamento vertical deste sistema de varões e a sua conveniente selagem com argamassa não retráctil ou através da colocação de chapas de ligação. A secção média dos pilares é de 0.5x0.7 m e a altura média é de 17m. Os painéis e os muros apresentam uma espessura de 0.22m e de 0.20m, respetivamente.

O cálculo estrutural do pavilhão novo englobou o cálculo das ações sísmicas (Eurocódigo 8). Na Figura 14 são apresentadas algumas vistas do edifício após a sua construção.



Figura 14-Fotos do edifício após a construção

As plantas de arquitetura referentes à estrutura, encontram-se no Anexo D.

Modelo 3D BIM

Para o desenvolvimento do modelo BIM 3D foram fornecidas plantas, alçados e cortes do pavilhão em formato digital Autocad 2D.

Na Figura 15 é apresentado o modelo do pavilhão novo em vista 3D, que foi desenvolvido com recurso ao software Autodesk Revit.

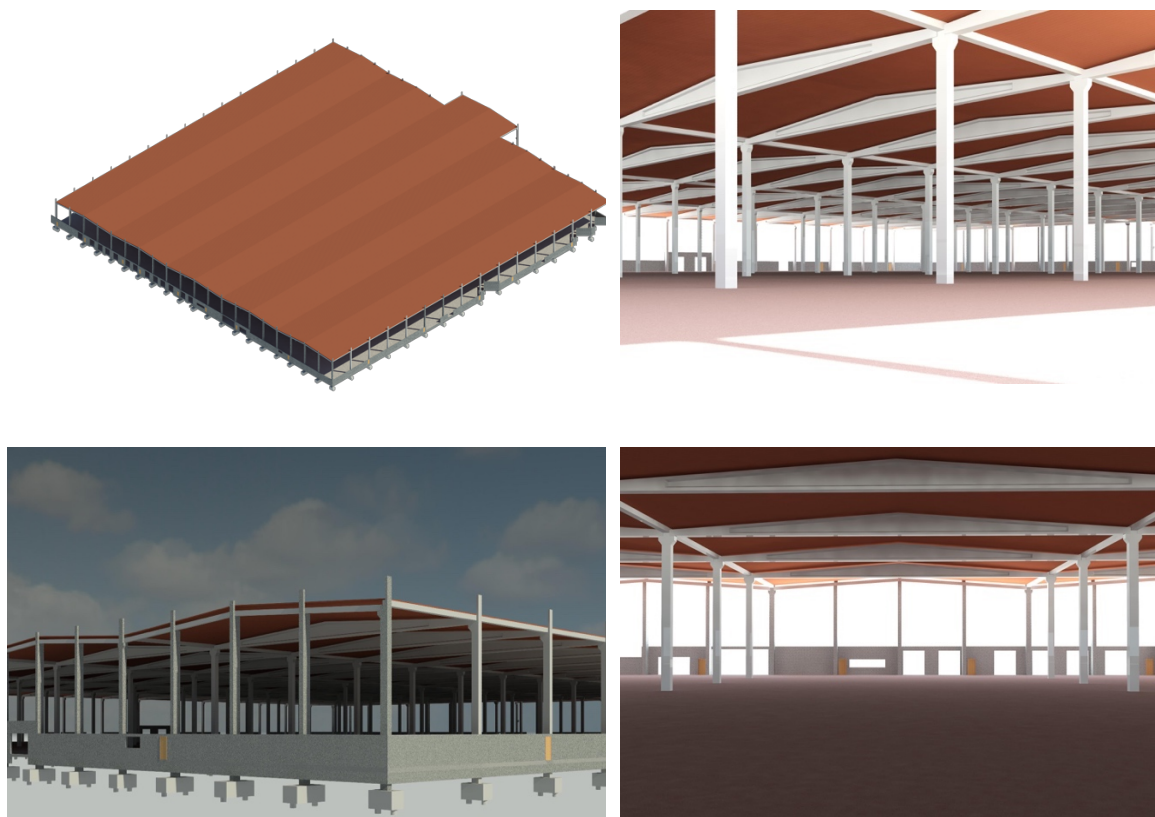


Figura 15-Vista 3D do pavilhão novo

6.2.2. Pavilhão industrial existente

Para a definição estrutural do pavilhão industrial existente (com as mesmas características do pavilhão de construção nova referido no ponto anterior), efetuou-se a análise de 16 projetos de pavilhões de construção anteriores ao ano 2000.

Tratando-se de modelos mais antigos, a geometria de alguns elementos difere. A secção média dos pilares é 0.4x0.4 m. Para além disso, de acordo com os dados fornecidos, a quantidade de aço do pavilhão existente é 0.5% inferior à do pavilhão novo.

O pavilhão existente foi modelado à semelhança do pavilhão de construção nova, com uma área bruta total de construção de 34 614.42 m² e com uma estrutura formada por vigas, pilares, muros e painéis pré-fabricados, em betão armado e betão pré-esforçado.

A estrutura de cobertura é constituída por vigas de secção variável com 35m de comprimento (VSV), por vigas caleira (VC) e por vigas retangulares (VR), com aproximadamente 12m de

comprimento. Todas as vigas da estrutura assentam sobre cachorros ou sobre a cabeça dos pilares, mas não há ligações entre estes elementos, o que potencia um risco de ocorrência de danos de carácter estrutural caso haja um sismo. Por isso, para garantir um bom desempenho sísmico, este edifício necessita de ser reforçado.

Modelo 3D BIM

Na Figura 16 é apresentado o modelo 3D BIM que se desenvolveu para representar o pavilhão existente em vista 3D.

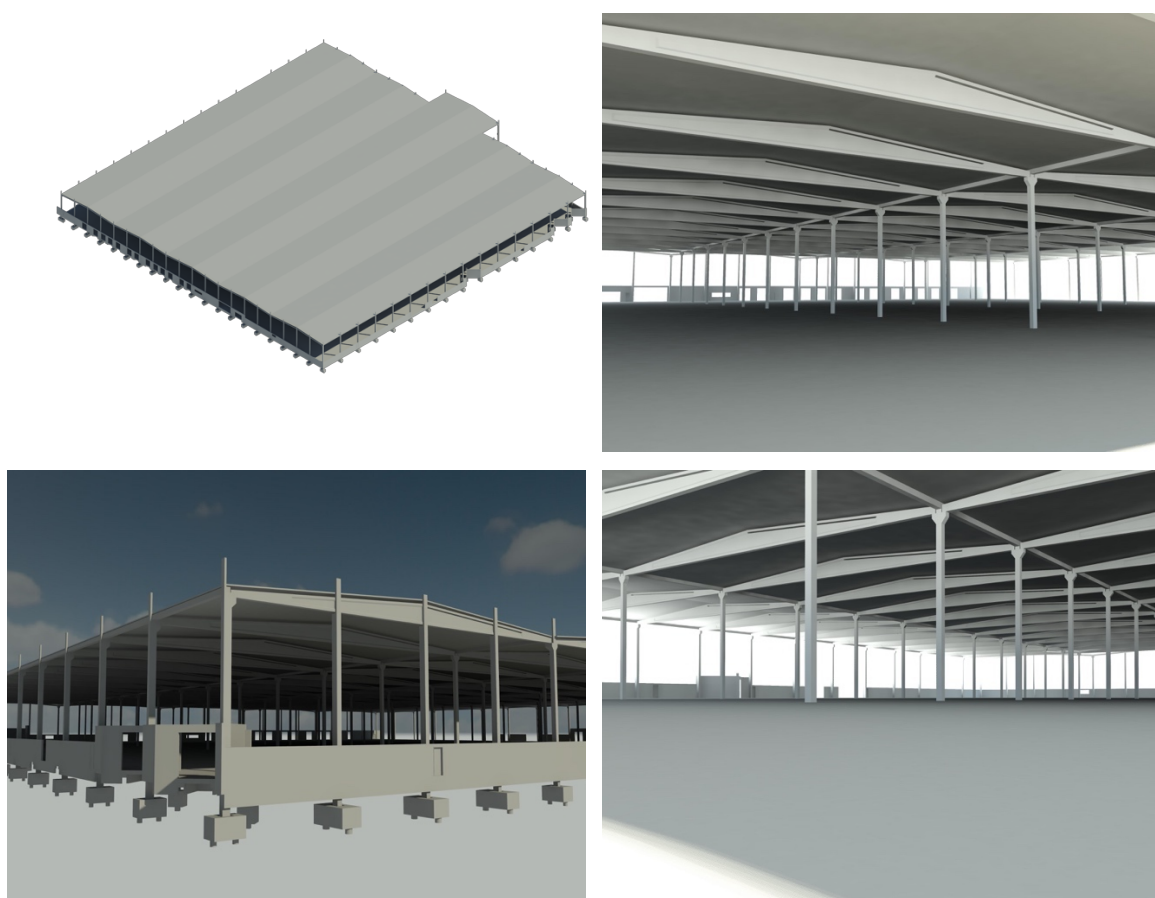


Figura 16-Vista 3D do pavilhão existente

6.3. Metodologia

Este trabalho pretende elaborar um estudo comparativo do ACV e do CCV dos elementos pré-fabricados de um edifício industrial novo e do reforço sísmico de um edifício similar existente com 30 anos. No caso do pavilhão existente, o objetivo não é analisar os impactes

ambientais e o custo dos elementos estruturais pré-fabricados, mas sim, avaliar a ACV e o CCV do reforço sísmico desses elementos e da demolição do edifício existente após o fim do seu período de vida útil (50 anos). Assim, não foi considerada a construção dos elementos pré-fabricados do edifício existente, porque, mesmo para uma situação hipotética, não há informações suficientes para a aplicação da ACV referentes a essa fase.

Como tal, este trabalho encontra-se dividido em 4 fases. A primeira consistirá na modelação do edifício novo em Autodesk Revit, com base em dados fornecidos pela equipa técnica. Este modelo também servirá de base para o modelo do edifício existente, respeitando, as características dos projetos anteriores ao ano 2000. Apesar do foco ser os elementos estruturais pré-fabricados de betão armado, as fundações, a cobertura e outros elementos, também foram modelados para permitir uma melhor visualização do modelo.

A segunda fase tem como propósito calcular a ACV. Portanto, serão definidos o âmbito e o objetivo e será efetuado o inventário e a avaliação do impacto ambiental de cada um dos edifícios.

Na terceira fase serão calculados os custos de execução e demolição do edifício novo e os custos do reforço sísmico e demolição do edifício existente.

Por fim, será apresentada a discussão dos resultados.

Na Figura 17 são esquematizados os objetivos do trabalho e as fases em que se pretende estudar o ACV e o CCV do pavilhão novo e do pavilhão existente.

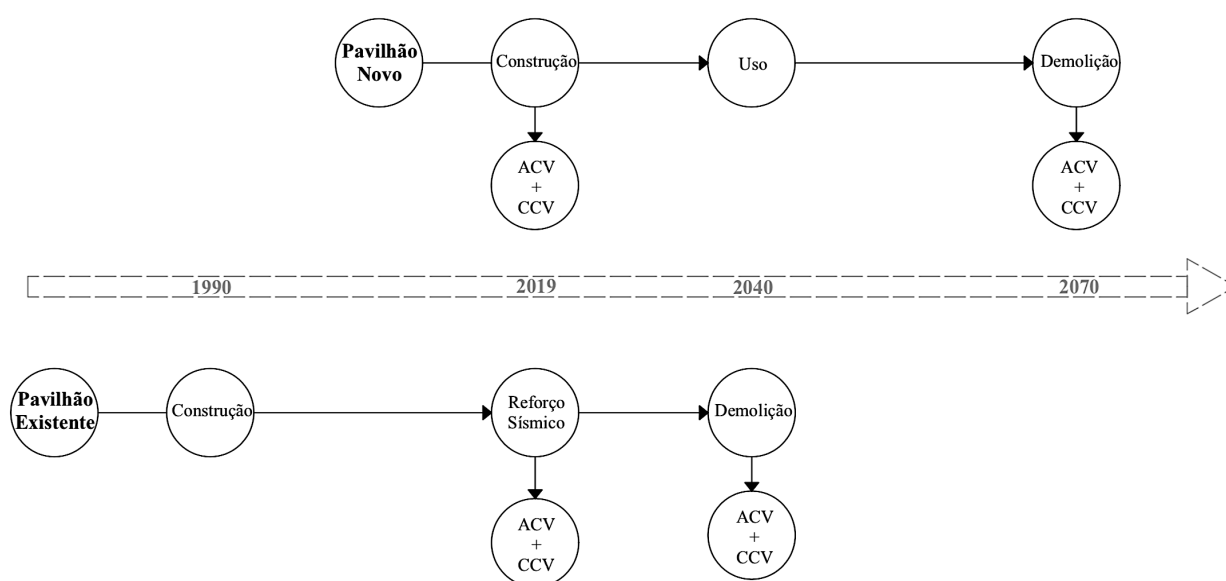


Figura 17-Fases de implementação das metodologias ACV e CCV no pavilhão novo e no pavilhão existente

A Figura 18 apresenta a metodologia de trabalho que se implementou.

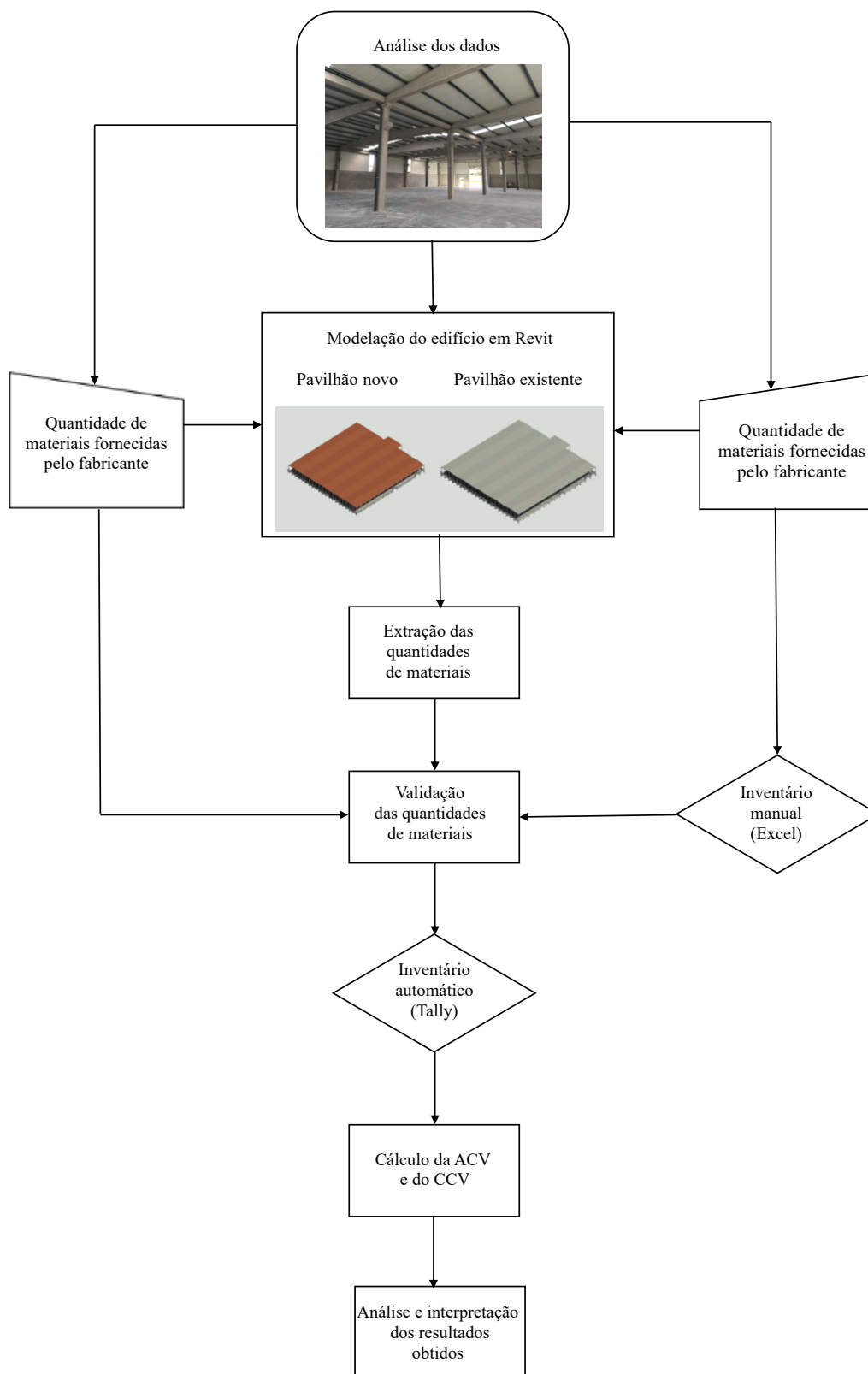


Figura 18- Metodologia de trabalho

6.3.1. Tally

O Tally é uma ferramenta BIM que permite de forma rápida, calcular e analisar a ACV e os impactos ambientais, de um edifício e dos seus componentes, considerando as fases do ciclo de vida mais estudadas, numa análise *cradle-to-grave* (Santos *et al.*, 2016; Aljundi K., 2017). A base de dados do Tally da versão académica é a GaBi e o modelo de cálculo é o TRACI 2.1 (*Tool for the Reduction Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*), embora, disponha de outras como a CML, IMPACT, ReCiPe e EcoIndicator na versão comercial (Santos *et al.*, 2016).

O TRACI 2.1 é um modelo de impacto ambiental *midpoint* desenvolvido pela US EPA para quantificar as emissões para o ambiente nos Estados Unidos. Os impactos associados à utilização do solo e à redução de água doce não são incluídos na base de dados utilizada (EPA, 2012).

O Tally é indicado para o setor da construção e tem como vantagens a possibilidade de comparar, no mesmo modelo, o impacto ambiental de diferentes soluções construtivas e de especificar a massa volúmica de grande parte dos materiais disponíveis na base de dados. Para além disso, esta ferramenta fornece a possibilidade de estudar o material sem precisar de modelar o elemento.

Como desvantagens, o Tally é destinado somente para o mercado americano e impossibilita a (1) edição dos componentes dos materiais existentes na base de dados, (2) o cálculo dos impactos do uso e da demolição do edifício e (3) a inclusão de materiais reciclados.

Contudo, como um dos objetivos do trabalho é analisar a integração do BIM-ACV, foi priorizada a escolha de ferramentas que estivessem diretamente integradas no modelo BIM. Assim, perante ferramentas tradicionais como o SimaPro, que possuem diversas bases de dados e fazem uma análise *cradle-to cradle*, o Tally está melhor integrado num modelo BIM. Para além disso, o Tally mostra ser mais vantajoso diante de ferramentas como o IMPACT, eveBIM-ELODIE e Arquimedes, porque está melhor integrado num programa BIM e tem a capacidade de gerar relatórios em formato pdf e xlsx, o que permite manipular facilmente os resultados obtidos (Santos *et al.*, 2016).

6.3.2. Cálculo da ACV

Tal como foi destacado no Capítulo 3, a ACV tem 4 fases: definição do âmbito e do objetivo, inventário, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação. Esta última será abordada no Capítulo 7.

6.3.2.1. Definição do âmbito e do objetivo

É nesta fase que se define os objetivos, a equivalente funcional dos materiais, as condições fronteira e as possíveis limitações.

Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é perceber qual das alternativas apresenta um menor impacto ambiental. Para tal, os impactos inerentes à conceção e implementação dos elementos estruturais do pavilhão novo serão comparados aos impactos ambientais da inserção do reforço sísmico no pavilhão existente.

Equivalente Funcional

Cada material tem a sua equivalente funcional, sendo a do aço 1 kg e a do betão 1m³. Porém, a equivalente funcional do presente caso de estudo será 1 m² de área construída.

Condições Fronteira

Relativamente às condições fronteira, será necessário ter em conta as normas europeias e as limitações do software.

Tal como mencionado anteriormente, o Tally faz uma análise *cradle-to-grave*, por isso, esta será a abordagem utilizada neste estudo.

A Figura 19, apresenta os módulos de informação aplicados na avaliação do desempenho económico de um edifício, segundo a EN 15643-4 (2015):

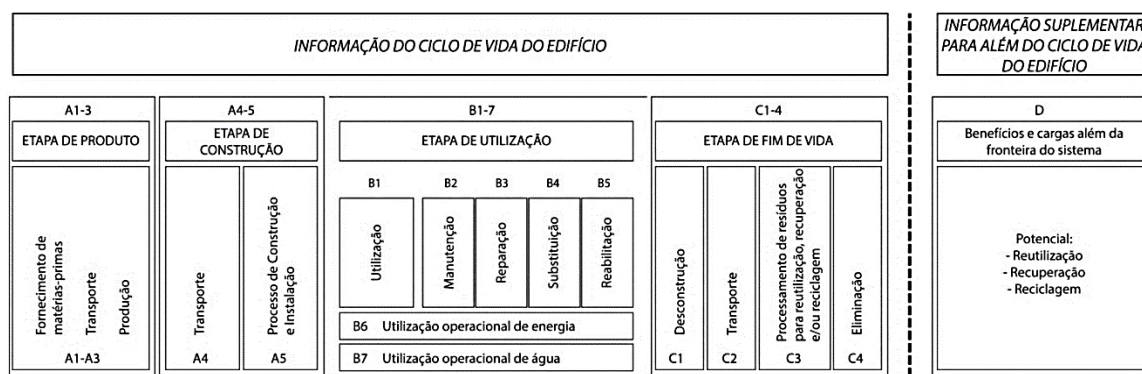


Figura 19- Módulos de informação aplicados na avaliação do desempenhos económico de um edifício (Fonte: EN 15643-4 2015)

6.3.2.1.1. Módulos de avaliação e limitações

Este estudo apresenta algumas limitações, pelo que na conceção do trabalho, foram realizadas algumas suposições:

- Módulos de avaliação

A ferramenta Tally não calcula os impactes ambientais de todas as fases apresentadas. A Figura 20 mostra, a negrito, as fases que são calculadas pela ferramenta.

PRODUCT	CONSTRUCTION	USE	END-OF-LIFE	MODULE D
A1. Extraction A2. Transport (to factory) A3. Manufacturing	A4. Transport (to site) A5. Construction Installation	B1. Use B2. Maintenance B3. Repair B4. Replacement B5. Refurbishment B6. Operational energy B7. Operational water	C1. Demolition C2. Transport (to disposal) C3. Waste processing C4. Disposal	D. Benefits and loads beyond the system boundary from: 1. Reuse 2. Recycling 3. Energy recovery

Figura 20-Módulos de avaliação calculados pelo Tally (Fonte: Relatório Tally)

- Fase de produção

Esta fase inclui a extração e o processamento das matérias-primas, o transporte entre a zona de extração e a fábrica e a fabricação do produto. Os equipamentos necessários para o fabrico e montagem dos materiais de construção não estão incluídos, pois não fazem parte do âmbito da avaliação.

– Fase de construção

Na fase de construção, os impactes no estaleiro serão desprezáveis porque grande parte é proveniente do consumo elétrico dos equipamentos que serão simultaneamente usados noutra fase da construção. Não obstante, a fase de construção apresenta um impacte ambiental reduzido, quando comparado à energia incorporada dos materiais (Aljundi K., 2017). Assim, só será incluído o transporte da fábrica ao local de obra. Este será feito por um camião.

– Fase de utilização

Apesar da fase operacional ser aquela com maior impacte ambiental, no presente caso de estudo, esta não será contabilizada, dado que as características dos edifícios são similares e por conseguinte, os valores nesta fase também serão. Não obstante, o Tally não considera os impactes ambientais da fase de utilização (B1).

Para a fase de manutenção, esta inclui a substituição de materiais de acordo com o período de vida útil do edifício. São incluídas as fases de tratamento no fim de vida dos produtos, bem como, a fabricação e o transporte dos materiais até ao local onde serão substituídos. Como não foi considerada nenhuma ação de manutenção no edifício, esta fase não será contabilizada.

– Desconstrução/Demolição

Nesta fase são incluídos os requisitos e a taxa para a reciclagem de materiais, a taxa de incineração e as taxas de aterro. Os impactes calculados são baseados em propriedades médias do material, como os resíduos plásticos, resíduos biodegradáveis ou materiais inertes. Assim, considera-se o transporte do local de obra até à zona de tratamento dos resíduos e os impactes associados ao aterro e à incineração.

O software Tally não contabiliza a fase de demolição no cálculo do ACV, mas indica a percentagem que irá para aterro e a que será reciclada, por isso, será calculada a quantidade de resíduos provenientes da demolição, o custo associado a esta atividade e a quantidade que será recuperada.

– Módulo D

Indica os potenciais de reutilização que estão para além dos limites do sistema, como a recuperação de energia e reciclagem de materiais, e outras operações de recuperação não incluídas no ciclo de vida do edifício. Caso se pretenda incluir, estes devem ser agrupados como informação sobre cargas e benefícios potenciais para outros sistemas (NP 15643-2, 2014). No presente caso de estudo estes resultados não são contabilizados no ciclo, dado que, o Tally só faz uma análise *cradle-to-grave*.

6.3.2.2. Inventário

O inventário pode ser realizado de forma automática (Tally) ou manual (CYPE). Nos pontos seguintes, apresenta-se a descrição das características e da quantidade dos elementos estruturais do pavilhão industrial novo e efetua-se uma comparação entre os dados reais e os dados obtidos no Tally. Para o pavilhão industrial existente é apresentada a solução de reforço sísmico e os materiais que serão utilizados aquando da sua execução. A quantidade de materiais será obtida com base no gerador de preços CYPE, e posteriormente este valor será comparado com o da ferramenta Tally.

6.3.2.2.1. Pavilhão industrial novo

Tal como referido, os materiais foram selecionados com base nos documentos fornecidos pelo fabricante.

Pilar

Os pilares são de betão armado pré-fabricado de classe C40/50, a classe de exposição ambiental é XC4 e a classe estrutural S4. A armadura é A500 NR-SD. São 131 pilares de secções variáveis com 17 metros de altura e recobrimento nominal de 40 mm.

Viga

As vigas são de betão armado pré-fabricado de classe C40/50, a classe de exposição ambiental é XC4 e a classe estrutural S4. A armadura é de pré-esforço A1670/1770. São 189 vigas de secções variáveis, sendo 92 vigas caleira, 20 vigas retangulares e 77 vigas “Madre Max”.

Painel

Os painéis são de betão armado pré-fabricado de classe C30/37, a classe de exposição ambiental é XC4 e a classe estrutural é S4. A armadura é A500 ER. São 144 painéis de espessura, comprimento e altura variáveis.

Os dados fornecidos pelo fabricante foram introduzidos no modelo, o que permitiu o cálculo dos impactos ambientais dos elementos pré-fabricados.

- Seleção dos materiais

Como o Tally tem a sua própria base de dados, optou-se por utilizar aqueles materiais que tinham características mais semelhantes às que foram fornecidas. A Tabela 2 apresenta a descrição dos materiais utilizados.

Tabela 2-Descrição dos materiais

Elemento	Caso Real	Tally
Pilar	Betão C40/50+A500	Structural concrete, 4001-5000 psi, 0-19% fly ash and/or slag+ steel, reinforcing rod
Viga	Betão C40/50 + A1670/1770	Structural concrete, 4001-5000 psi, 0-19% fly ash and/or slag+ steel, cable
Painel	Betão C30/37+A500	Structural concrete, 4001-5000 psi, 0-19% fly ash and/or slag+ steel, welded wire mesh

No Tally, o transporte que mais se adequa a este caso de estudo é o camião-reboque com 22.5 toneladas de carga útil e movido a diesel. A distância da fábrica até o local de construção é de 636 km (ida e volta).

6.3.2.2. Pavilhão industrial existente

Segundo Bournas, Negro e Taucer (2014) uma possível solução de reforço sísmico seria materializada pela instalação de varões de aço nas ligações viga-viga e de um sistema de cabos ancorados nas ligações viga-pilar. Para além disso, os painéis devem ser conectados aos pilares através de elementos de fixação. Na Figura 21 apresenta-se a solução de reforço sísmico proposta por esses autores e adotada no presente trabalho.

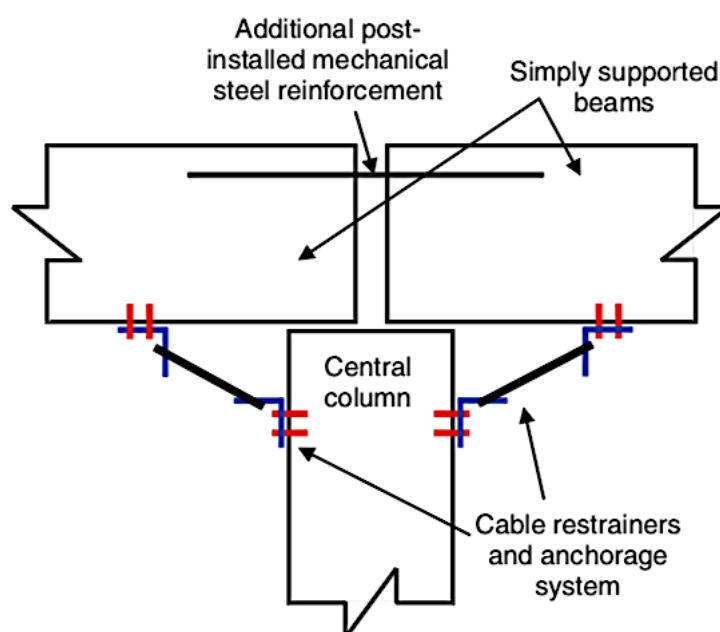


Figura 21-Solução proposta de reforço sísmico (Fonte: Bournas, Negro e Taucer, 2014)

A Figura 22 mostra a ligação entre o painel e o pilar:



Figura 22- Ligação painel-pilar

– Seleção dos materiais

Neste caso, não foram fornecidas as quantidades de aço, pelo que o diâmetro dos varões foi obtido com base em projetos reais (Arrigoni *et al.*, 2018; Bui *et al.*, 2019). O comprimento e outras medidas adicionais foram calculadas considerando a base de dados CYPE, a biblioteca da (OCC) e as dimensões do pavilhão.

Tabela 3-Descrição dos materiais utilizados no reforço sísmico

Tipologia	Caso Real	Tally
Ligação viga-viga	Varão de aço + Grout	Fasteners, stainless steel ¹ + Structural concrete, 0-2500 psi, 20-29% fly ash (without reinforcement)
Ligação viga-pilar	Varão de aço + Elemento de fixação	Fasteners, stainless steel+ Fasteners, galvanized steel
Ligação painel-pilar	Elemento de fixação	Fasteners, galvanized steel

Ligação viga-viga

A ligação das vigas será materializada com 1 varão de aço nervurado de 20 mm de diâmetro e 1.23 m de comprimento. É realizada uma ancoragem mecânica por corte interior, com 37 mm de diâmetro e 250 mm de profundidade, através de um furo com martelo percutor e broca, sobre o elemento de betão. Por fim, é colocada uma argamassa de elevada resistência (Grout).

Ligação viga-pilar

Cada ligação contempla 2 elementos de fixação e um varão de aço nervurado. Os elementos de fixação são perfis em aço laminado a quente da série L, com acabamento galvanizado a quente, fixado mecanicamente com parafusos de aço. O varão de aço nervurado tem 20 mm de diâmetro e 1.5 m de comprimento.

¹ O Tally tem o varão de aço na sua base de dados, porém, quando introduzido abaixo da quantidade normal prevista num elemento pré-fabricado, o programa inviabiliza os valores, pois, assume que estes colocam em causa a segurança da estrutura. Ou seja, se quiser utilizar os varões de aço como reforço sísmico, tenho que considerar a quantidade total no elemento e não apenas a do reforço. Assim, optou-se pelos fixadores.

Ligação painel-pilar

Os painéis estão conectados aos pilares através de elementos de fixação semelhantes aos descritos anteriormente. Assume-se que cada pilar contém 12 elementos, 6 de cada lado.

Considerou-se que a distância entre a fábrica e o local de obra é de 100 km (ida e volta). O camião é semelhante ao do primeiro caso.

6.3.2.3. Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida

Para se proceder à Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (AICV) é necessário relacionar os indicadores de impacto com as categorias de impacto. Os indicadores de impacto ou forçamento radioativo infravermelho são substâncias naturais e/antropogénicas que alteram a quantidade de energia terrestre. Nesta secção inclui-se as emissões atmosféricas. De acordo com Stocker *et al.* (2013) as emissões positivas levam ao aquecimento da superfície terrestre e as emissões negativas levam ao arrefecimento da superfície.

De seguida, na Figura 23, apresenta-se um esquema que indica a relação entre as emissões atmosféricas, as categorias de impacto, os indicadores de categoria e a área de impacto.

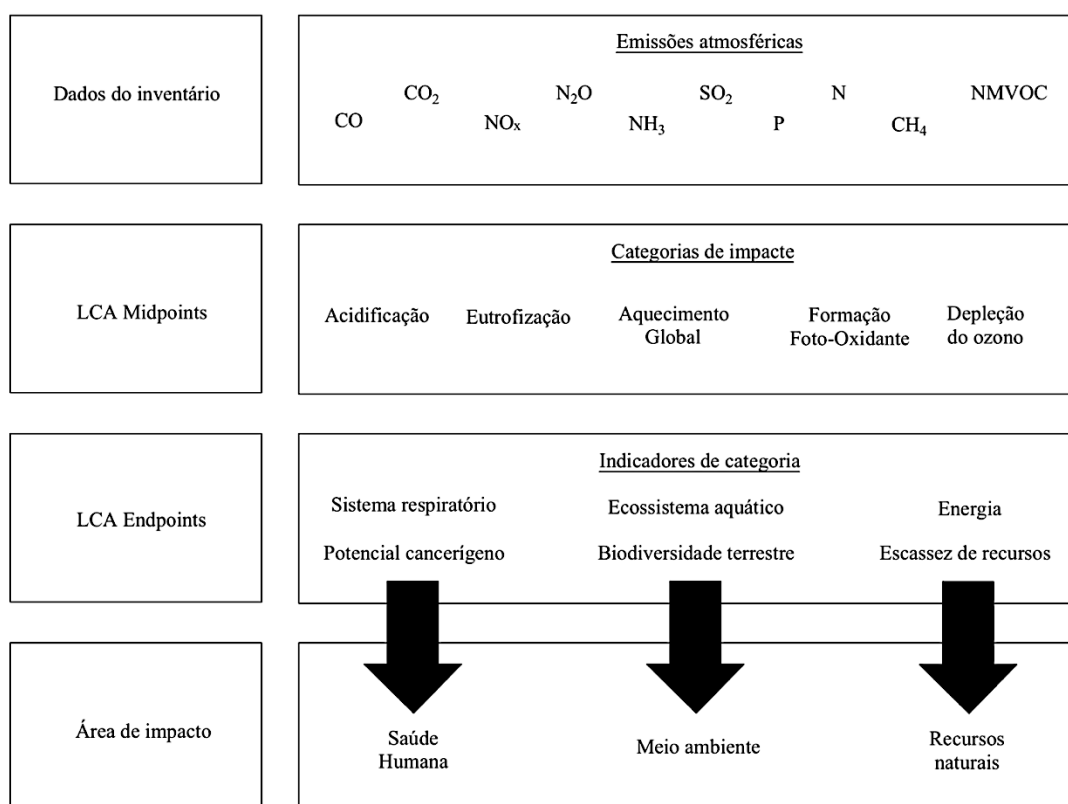


Figura 23-Metodologia exemplificativa: dados do inventário, *midpoints*, *endpoints* e áreas de impacto (adaptado de: Pennington *et al.*, 2004; Anthonissen, Braet e Den, 2015; Almeida, 2018)

As categorias de impacto são definidas de acordo com o objetivo da análise e a base de dados da ferramenta. Os impactos ambientais são calculados através do TRACI, uma metodologia *midpoint*, por isso, as categorias de impacto que serão utilizadas são:

- i) Aquecimento Global (kg CO₂ eq)
- ii) Depleção da camada de ozono (kg CFC eq)
- iii) Acidificação (kg SO₂ eq)
- iv) Eutrofização (kg NO_x eq)
- v) Formação foto-oxidante (kg O₃ eq)

Embora a EN 15804: 2013 e outros trabalhos considerem outras categorias de impacto, estas são as que são consideradas no Tally.

Aquecimento Global

O dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o vapor de água (H₂O) são gases que sempre existiram na atmosfera. Estes têm a capacidade de absorver a radiação proveniente do Sol e da superfície da Terra (reflexão), causando naturalmente, o efeito de estufa.

Com o crescente aumento de emissões, a temperatura terrestre aumentou, trazendo consequências diretas no ecossistema e na saúde humana.

O potencial efeito de estufa de um processo é estimado a partir do cálculo da quantidade de gás de efeito estufa emitido por equivalente funcional e o potencial efeito de estufa fornecido em kg CO₂-eq (Almeida, 2018).

Depleção da camada de ozono

A camada de ozono tem como principal função, proteger a superfície terrestre da ação da radiação, por isso, a sua redução traz consequências nefastas para a saúde humana e para o meio ambiente (EPA, 2012).

Com o aumento da concentração de gases clorofluorcarbonetos (CFC), presentes em aerossóis e gases de refrigeração, o ozono estratosférico reduziu, o que levou ao aumento da quantidade de radiação refletida na superfície terrestre.

Ao contrário da maioria dos indicadores de impacto, a emissão de CFC tem um efeito negativo e provoca o arrefecimento da superfície terrestre. O efeito é contrário quando há

absorção de carbono negro (Stocker *et al.*, 2013). Como esses impactes tendem a ser muito reduzidos, podem ser difíceis de calcular. Para além disso, o cálculo da depleção de ozono possui uma margem de erro superior às outras categorias de impacto (EPA, 2012).

Acidificação

A acidificação corresponde ao aumento da concentração de ião hidrogénio (H^+) num determinado meio.

Os poluentes atmosféricos primários que contribuem para a acidificação são o dióxido de enxofre (SO_2), os óxidos de azoto (NO_x) e o amoníaco (NH_3). As emissões atmosféricas, sobretudo do SO_2 e do NO_x , provêm da queima de combustíveis fósseis, que após a sua deposição, podem alterar a composição química do solo e da superfície da água (diminuição do pH), bem como, contribuir para a formação das chuvas ácidas. Para além disso, estas substâncias podem deteriorar os materiais de construção, pinturas e outras estruturas (EPA, 2012).

Eutrofização

A eutrofização corresponde a um processo em que há um enriquecimento excessivo, tanto no meio aquático como no terrestre, de elementos nutritivos, principalmente azoto (N) e fósforo (P), causando um crescimento anormal das espécies para níveis que põem em causa o equilíbrio desses ecossistemas.

No meio aquático, os principais efeitos são a redução do oxigénio e consequentemente, a redução da biodiversidade marinha, dado que, a diminuição do oxigénio e o aumento de dióxido de carbono, impossibilitam a capacidade de manutenção da fauna e da flora (EPA, 2012).

Formação foto-oxidante

A formação de oxidantes fotoquímicos (ou *smog*) refere-se a um fenómeno que ocorre sob a influência da radiação solar, onde são criadas reações químicas entre o óxido de azoto (NO_x) e os compostos orgânicos voláteis (VOCs). Estes gases provêm das emissões fabris, motores de veículos, solventes químicos, entre outros e a sua presença é comum em situações de baixa humidade e na presença de luz solar. Por serem compostos altamente reativos e tóxicos, podem aumentar a concentração de ozono troposférico.

O ozono troposférico é uma das maiores ameaças ambientais, dado que, causa danos à saúde humana e aos ecossistemas (EPA, 2012).

6.3.3. Cálculo do CCV

Tal como foi referido no Capítulo 2, o CCV consiste no somatório de estimativas de custos, desde a conceção até à deposição final. Este método, com base nas opções existentes, permite seleccionar a alternativa mais eficiente e económica.

As fases da CCV são: (1) estabelecimento de alternativas de projeto, (2) determinação do planeamento da manutenção e reabilitação, (3) estimativa de custos, (4) cálculo do custo do ciclo de vida e (5) análise dos resultados.

A fase “estimativa de custos” salienta que só é obrigatório explorar os custos que demonstrem diferenças entre alternativas, portanto, apesar de a fase operacional ter maior impacto ambiental, como no presente caso de estudo os edifícios são semelhantes, é expectável que os valores obtidos nesta fase também sejam. Assim, para calcular o CCV, serão contabilizados os custos da fase de construção e demolição do edifício novo para um período de vida útil de 50 anos e o custo do reforço sísmico e demolição do pavilhão existente para um período de vida útil de 20 anos.

Embora a maioria dos modelos CCV utilize o VAL, este não pode ser aplicado quando as alternativas a comparar têm diferentes durações de vida útil.

6.3.3.1. Custo de construção

O orçamento calculado incluiu os custos do material, o custo do equipamento e o custo de mão de obra para a montagem dos elementos pré-fabricados: pilares, vigas e painéis.

Pilar

O custo dos pilares varia consoante a sua tipologia. De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, os pilares podem ser divididos em 4 grupos: P1, P2, P3 e P4. Porém, no CYPE, o que de facto os distingue é a quantidade de cachorros, por isso, na Tabela 4, encontram-se divididos os pilares consoante o número de cachorros.

Tabela 4-Quantidade de cachorros por pilar

Nº de cachorros	Tipologia
Sem cachorro	P4; P3H
Com 1 cachorro	P1; P1A; P1B; P1C; P1D; P1E; P1G; P1J; P1K; P3A; P3B; P3C; P3D; P3E; P3F; P3G
Com 2 cachorros	P1F; P1H; P2; P2A; P2B; P2C; P2D; P2E; P2F

Vigas

Nas vigas, a divisão do custo é de acordo com a tipologia das vigas apresentada pelo fabricante. Contudo, as dimensões introduzidas no CYPE correspondem a uma aproximação das medidas reais, dado que esta base de dados é limitada.

Painéis

Nos painéis, todos os elementos são diferentes, pelo que foi necessário calcular o custo para cada um dos elementos.

6.3.3.2. Custo de demolição

O orçamento obtido possui demolições dos elementos estruturais, impermeabilizações, plástico, vidro, tijolos, telhas e materiais cerâmicos, pelo que foi necessário realizar medições e retirar alguns materiais que não foram alvo de estudo (Anexo E). Assim, comparou-se os resultados obtidos no CYPE, com os obtidos no inventário do Tally, de modo a otimizar os resultados.

6.3.3.3. Custo de reforço sísmico

No cálculo do custo do reforço sísmico foram considerados o material, a mão de obra e os equipamentos. Para o seu cálculo utilizou-se a ferramenta CYPE e a biblioteca da OOC. Iniciou-se com o cálculo das quantidades de materiais, seguido do custo por elemento e por fim, o custo total. Tal como já se frisou anteriormente, o diâmetro do varão utilizado é de 20 mm.

No capítulo seguinte serão calculadas as quantidades, o peso dos elementos, o custo por elemento e o custo total. As informações obtidas nas bases de dados mencionadas encontram-se no Anexo E.

Capítulo 7

Discussão dos
resultados

Capítulo 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 Introdução

7.2. Interpretação dos resultados obtidos

7.2.1. Avaliação do ciclo de vida

7.2.1.1. Quantidade de materiais

7.2.1.2. Resultados por equivalente funcional

7.2.1.3. Resultados por fase de construção

7.2.1.4. Resultados por categoria

7.2.1.5. Demolição do pavilhão novo e do pavilhão existente

7.2.1.6. Comparação entre pavilhão novo e pavilhão existente

7.2.2. Custo do ciclo de vida

7.2.2.1. Custo de execução do pavilhão novo

7.2.2.2. Custo de demolição do pavilhão novo

7.2.2.3. Custo do reforço sísmico e da demolição do pavilhão existente

7.2.2.4. Comparação entre pavilhão novo e pavilhão existente

Capítulo 7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

7.1.Introdução

No capítulo anterior, apresentou-se as três primeiras fases do cálculo da ACV dos elementos pré-fabricados de um pavilhão e os fatores que serão considerados no cálculo do CCV. Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às duas situações e posteriormente será feita a sua interpretação, concluindo no final, que solução é mais sustentável. Para tal, este capítulo está dividido em duas fases: a primeira corresponderá à exposição dos resultados e a segunda à interpretação dos mesmos.

7.2.Interpretação dos resultados obtidos

7.2.1. Avaliação do ciclo de vida

7.2.1.1. Quantidade de materiais

As Tabelas 5 e 6 indicam a quantidade de aço e betão obtidos automaticamente através do modelo BIM 3D, no pavilhão novo e no pavilhão existente, respetivamente.

Tabela 5- Quantidade de material obtida no modelo BIM 3D para o pavilhão novo

Elemento estrutural e equivalente funcional	Quantidade (Tally)
Cabo de aço em vigas (kg)	59 874.40
Varão de aço em pilar (kg)	164 800.70
Rede malhasol no painel (kg)	10 002.00
Betão pré fabricado em vigas (m ³)	676.45
Betão pré fabricado em pilares (m ³)	1 565.00
Betão pré fabricado em painéis(m ³)	526.31

Tabela 6-Quantidade de material calculada e obtida no pavilhão existente

Tipologia	Material	Quantidade calculada (Excel)	Quantidade obtida (Tally)	Diferença
Ligação viga-viga	Varão de aço (kg)	653.19	669.07	2.37%
	Grout (kg)	115.585	116.5 ²	0.79%
Ligação viga-pilar	Varão de aço (kg)	1504.23	1551.86	3.07%
	Elementos de fixação (kg)	820.00	823.24	0.39%
Ligação painel-pilar	Elementos de fixação (kg)	628.8	631.94	0.50%

Ao contrário do pavilhão novo, em que o fabricante forneceu os dados dos elementos pré-fabricados, no pavilhão existente, os dados do reforço sísmico foram estimados com base no CYPE e na biblioteca OCCC. Assim, dada a complexidade dos elementos, os varões, o Grout e os elementos de fixação não foram modelados, mas sim, estimados. A diferença entre os valores deve-se ao facto de, ao introduzir os dados no Tally, a ferramenta não permitir a utilização de números decimais, pelo que só se utilizou valores inteiros.

Contabilizando apenas a quantidade de aço, obtém-se um valor total de 3 606.2 kg, enquanto que no Tally, este valor sobe para 3 676.12 kg, correspondendo a uma diferença de 1.90%. Sendo que, num panorama geral, a diferença é inferior a 3%, os valores obtidos automaticamente através do Tally são válidos, pelo que, todos os dados e cálculos efetuados serão feitos com base nos valores obtidos nessa ferramenta.

7.2.1.2. Resultados por equivalente funcional

Para calcular os impactes ambientais totais, deve-se efetuar o cálculo por equivalente funcional. Assim, as Tabelas 7 e 8 mostram, respetivamente, os impactes ambientais totais para cada um dos elementos do pavilhão novo e do pavilhão existente, por m² de área construída.

² Este valor corresponde a 0,0466 m³

Tabela 7- Impactes ambientais totais obtidos a partir do cálculo da equivalente funcional dos elementos do pavilhão novo, por m² de área construída, para um período de vida útil de 50 anos

Categoria de impacto	Total Potencial de Acidificação (kgSO₂eq)	Total Potencial de Eutrofização (kgNeq)	Total Potencial de Aquecimento Global (kgCO₂eq)	Total Potencial de Depleção do ozono (CFC-11eq)	Total Potencial de Formação Foto-oxidante (kgO₃eq)
Betão (1m³)	1.90E+00	1.48E-01	6.97E+02	-7.82E-07	4.60E+01
Varão de aço (1 kg)	7.68E-03	2.28E-04	1.54E+00	-3.42E-10	9.04E-02
Cabo de aço (1 kg)	5.77E-03	1.92E-04	1.14E+00	-3.42E-10	6.11E-02
Rede malhasol (1 kg)	6.90E-03	2.30E-04	2.27E+00	-3.42E-10	7.31E-02

Tabela 8- Impactes ambientais totais obtidos a partir do cálculo da equivalente funcional dos elementos do pavilhão existente, por m² de área construída, para um período de vida útil de 20 anos

Categoria de impacto	Total Potencial de Acidificação (kgSO₂eq)	Total Potencial de Eutrofização (kgNeq)	Total Potencial de Aquecimento Global (kgCO₂eq)	Total Potencial de Depleção do ozono (CFC-11eq)	Total Potencial de Formação Foto-oxidante (kgO₃eq)
Grout (1m³)	1.90E+00	1.48E-01	6.97E+02	-7.82E-07	4.60E+01
Varão de aço (1 kg)	7.18E-02	8.50E-03	4.85E+00	2.07E-07	2.52E-02
Elemento de fixação (1 kg)	1.46E-02	4.33E-04	5.10E+00	2.07E-07	3.61E-01

Para as duas situações, a categoria com maior impacte é o Aquecimento Global.

À exceção do elemento de fixação e do Grout, que apresenta a mesma definição que o betão do pavilhão novo, as Tabelas 7 e 8 mostram diferenças entre os valores obtidos para o varão de aço. Os valores por equivalente funcional do varão de aço deveriam ser iguais em ambas situações, porém, essa diferença deve-se ao facto de os materiais definidos na base de dados da ferramenta Tally serem distintos.

7.2.1.3. Resultados por fase de construção

Tal como foi frisado, não são calculados os impactes ambientais da fase operacional, por isso, o valor é zero. De seguida, são apresentados os resultados obtidos do cálculo dos impactes ambientais, por m² de área construída nas fases de produção, construção e deposição final, do pavilhão novo e do pavilhão existente. A Tabela 9 e a Figura 24 apresentam os valores obtidos no pavilhão novo.

Tabela 9-Impactes ambientais por m² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício novo

Categoria de impacto	Fase de Produção	Fase de construção	Deposição final
Total potencial de Acidificação (kgSO₂eq/m²)	1.52E-01	3.05E-02	1.70E-02
Total potencial de Eutrofização (kgNeq/m²)	9.95E-03	2.48E-03	8.63E-04
Total potencial de Aquecimento Global(kgCO₂eq/m²)	5.53E+01	6.58E+00	3.68E+00
Total potencial de Depleção do Ozono (CFC-11eq/m²)	-6.49E-08	2.25E-13	6.77E-13
Total potencial de Formação Foto-Oxidante (kgO₃eq/m²)	2.88E+00	1.01E+00	3.38E-01

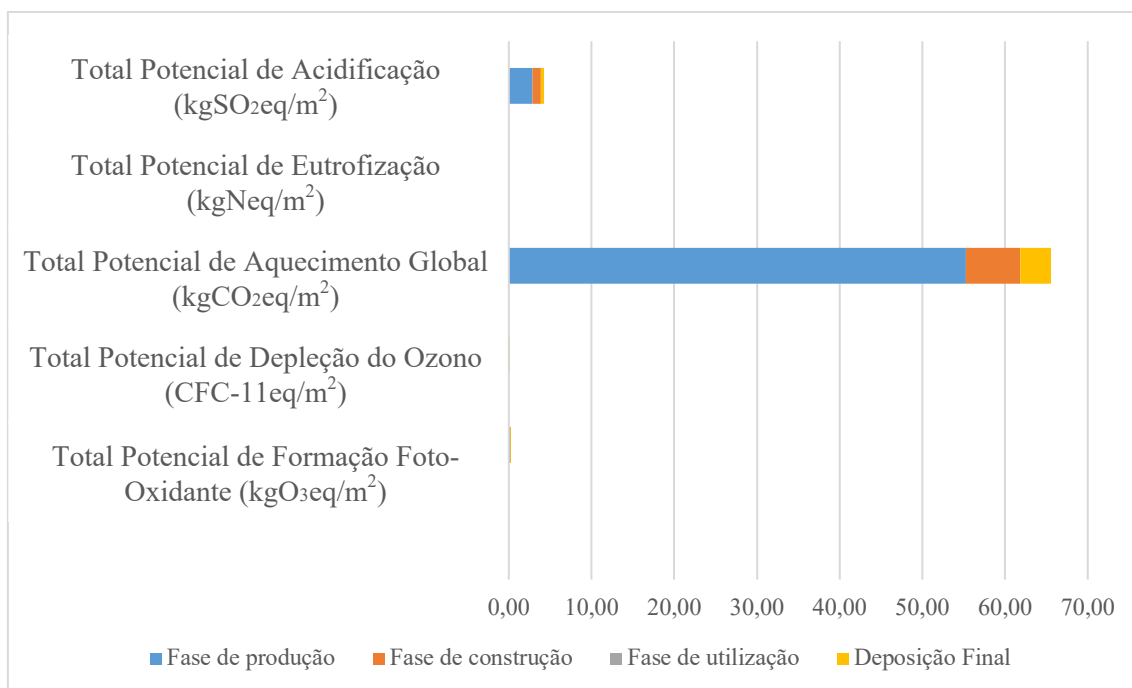


Figura 24- Impactes ambientais por m² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício novo
A Tabela 10 e a Figura 25 mostram os valores obtidos no pavilhão existente.

Tabela 10- Impactes ambientais por m² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício existente

Categoria de impacto	Fase de Produção	Fase de construção	Deposição final
Total potencial de Acidificação (kgSO₂eq/m²)	5.17E-03	2.72E-06	7.33E-07
Total potencial de Eutrofização (kgNeq/m²)	5.62E-04	2.22E-07	3.71E-08
Total potencial de Aquecimento Global(kgCO₂eq/m²)	5.09E-01	5.88E-04	1.58E-04
Total potencial de Depleção do Ozono (CFC-11eq/m²)	2.21E-08	2.01E-17	2.91E-17
Total potencial de Formação Foto-Oxidante (kgO₃eq/m²)	3.04E-02	9.00E-05	1.45E-05

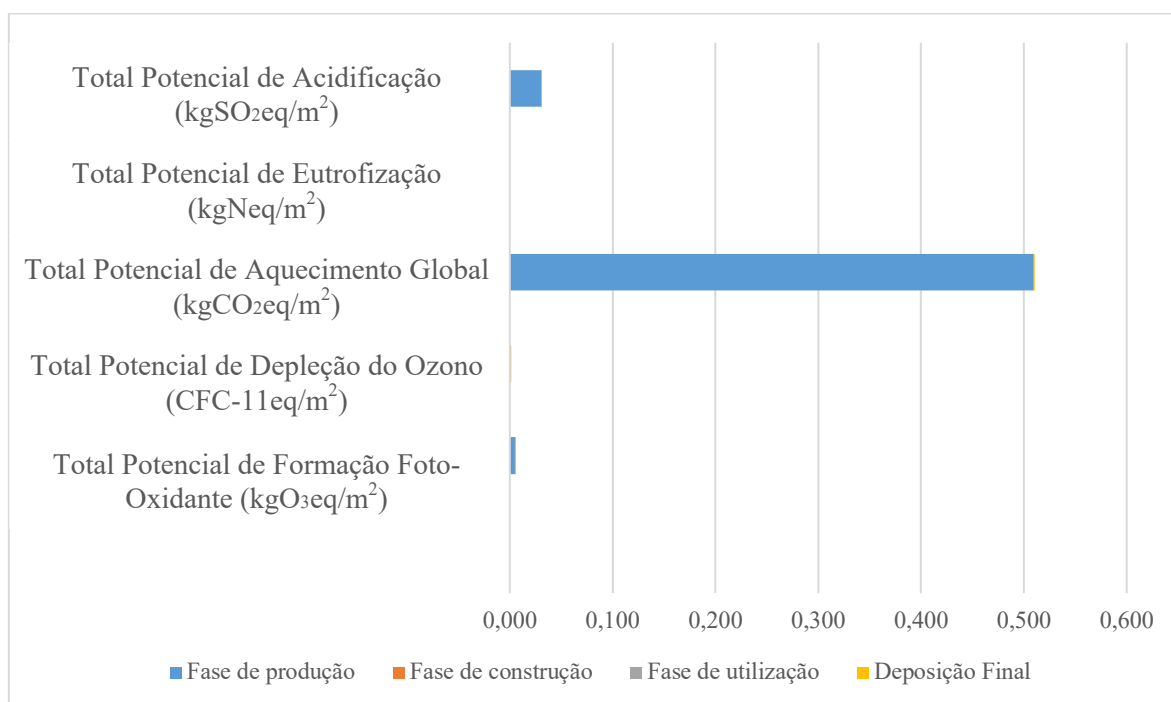


Figura 25-Impactes ambientais por m² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício existente

Assim, a Tabela 11 compara os impactes ambientais do pavilhão novo e do pavilhão existente.

Tabela 11-Impactes ambientais por m² de área construída relativos ao ciclo de vida do edifício novo e do edifício existente

Categoria de impacto	Fase de Produção		Fase de construção		Deposição final	
	PN	PE	PN	PE	PN	PE
Total potencial de Acidificação (kgSO ₂ eq/m²)	1.52E-01	5.17E-03	3.05E-02	2.72E-06	1.70E-02	7.33E-07
Total potencial de Eutrofização (kgNeq/m²)	9.95E-03	5.62E-04	2.48E-03	2.22E-07	8.63E-04	3.71E-08
Total potencial de Aquecimento Global(kgCO ₂ eq/m²)	5.53E+01	5.09E-01	6.58E+00	5.88E-04	3.68E+00	1.58E-04
Total potencial de Depleção do Ozono (CFC-11eq/m²)	-6.49E-08	2.21E-08	2.25E-13	2.01E-17	6.77E-13	2.91E-17
Total potencial de Formação Foto-Oxidante (kgO ₃ eq/m²)	2.88E+00	3.04E-02	1.01E+00	9.00E-05	3.38E-01	1.45E-05

Para cada m^2 foi calculado o impacto ambiental de cada uma das fases no edifício novo e no edifício existente, sendo possível constatar que:

- A fase com maior impacto é a de produção, seguida da fase de construção e por último da deposição
- A categoria com maior impacto é a do aquecimento global.

7.2.1.4. Resultados por categoria

O Tally também fornece informações sobre os elementos com maior impacto ambiental. Portanto, para o edifício novo, pode-se verificar que para todas as categorias, os elementos com maior impacto são as vigas, seguidas dos pilares e dos painéis.

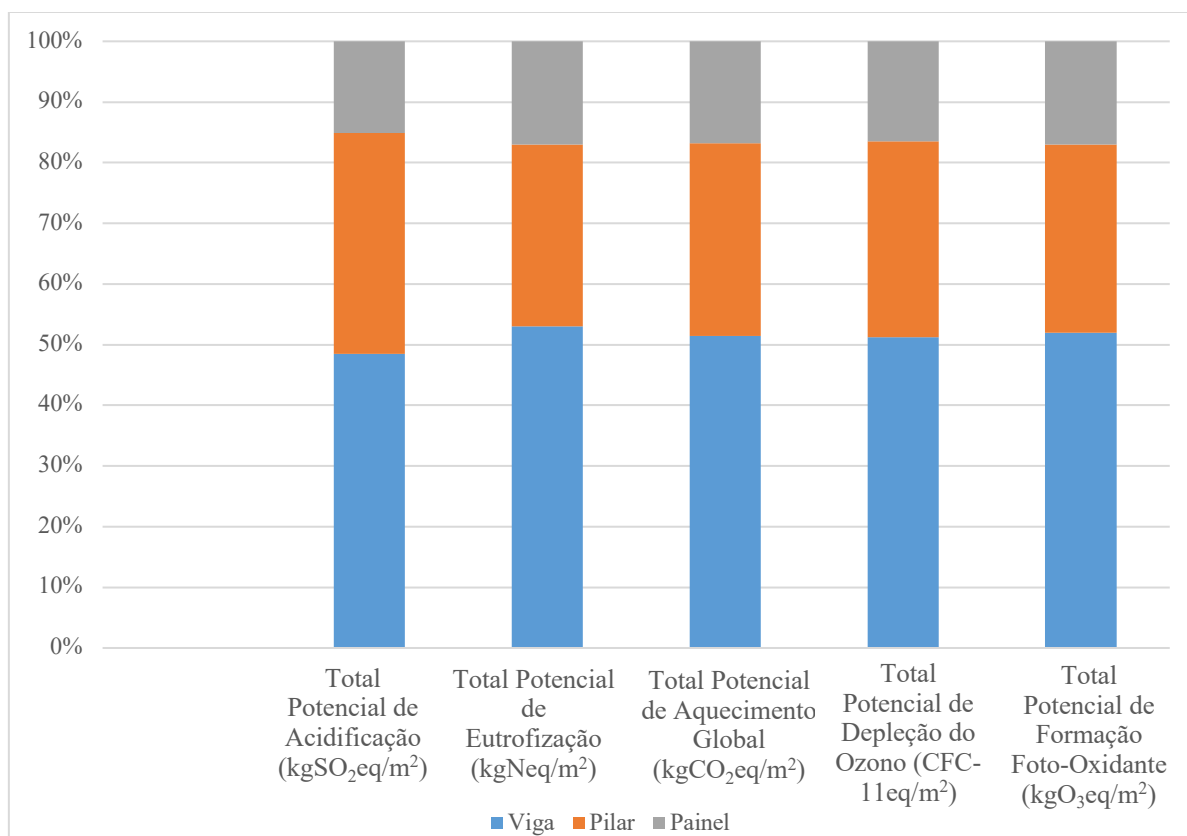


Figura 26- Impacto dos elementos no pavilhão novo

Esta diferença percentual, deve-se à quantidade de material gasta na concepção dos elementos estruturais, sendo maior nas situações em que há maior consumo de betão.

No edifício existente, a etapa com maior impacto é a ligação viga-pilar, seguida da ligação viga-viga e por último, a ligação painel-pilar (Figura 27).

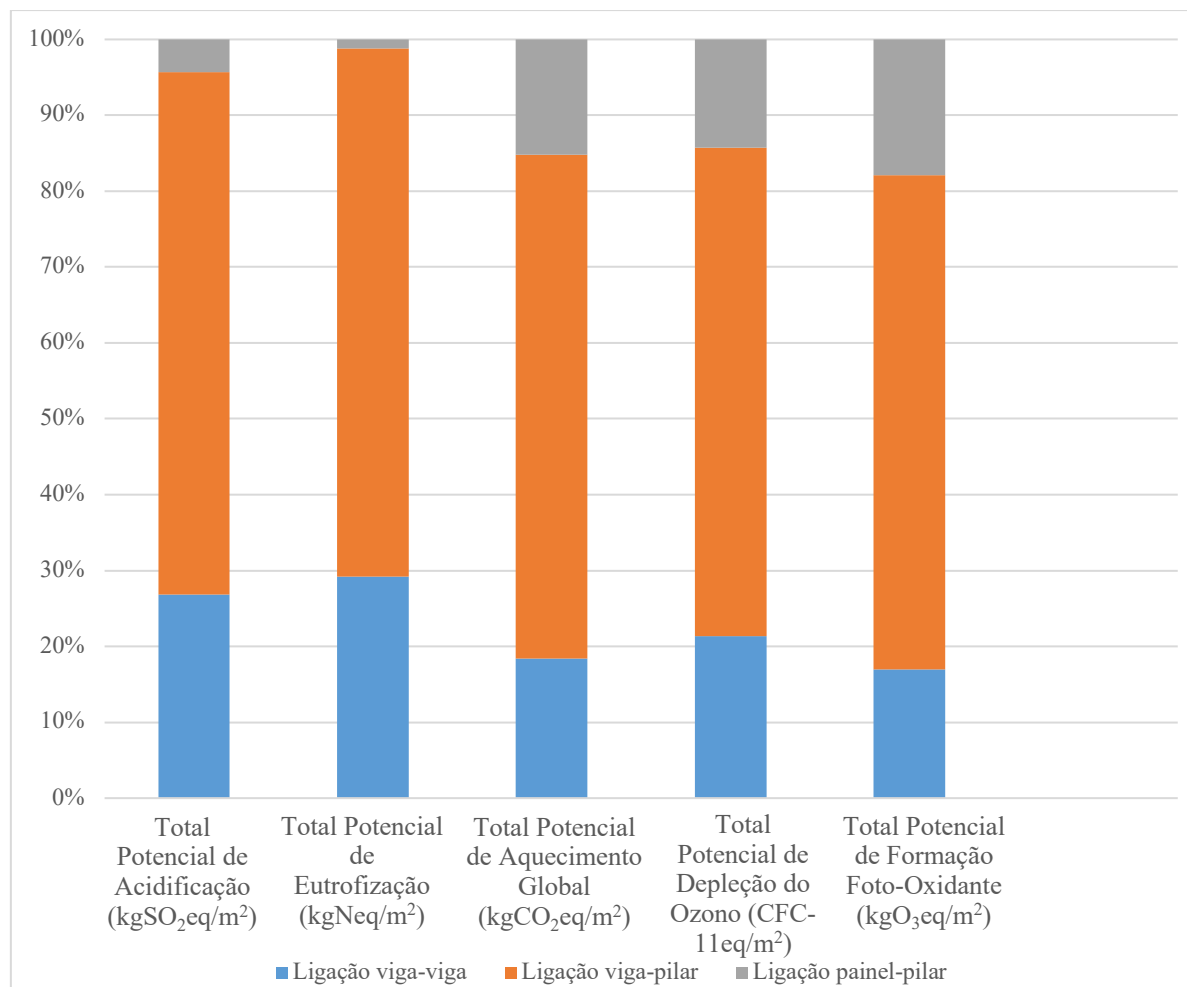


Figura 27-Impacte por ligação no pavilhão existente

A diferença deve-se ao facto de na ligação viga-pilar usar-se uma maior quantidade de aço.

7.2.1.5. Demolição do pavilhão novo e do pavilhão existente

O Tally não contabiliza os impactes ambientais gerados na demolição de um edifício, porém, contabiliza a quantidade que será reaproveitada e a que irá para aterro. A Figura 28 mostra, segundo a definição da base de dados do Tally, a percentagem que é recuperada e a percentagem que constitui aterro.

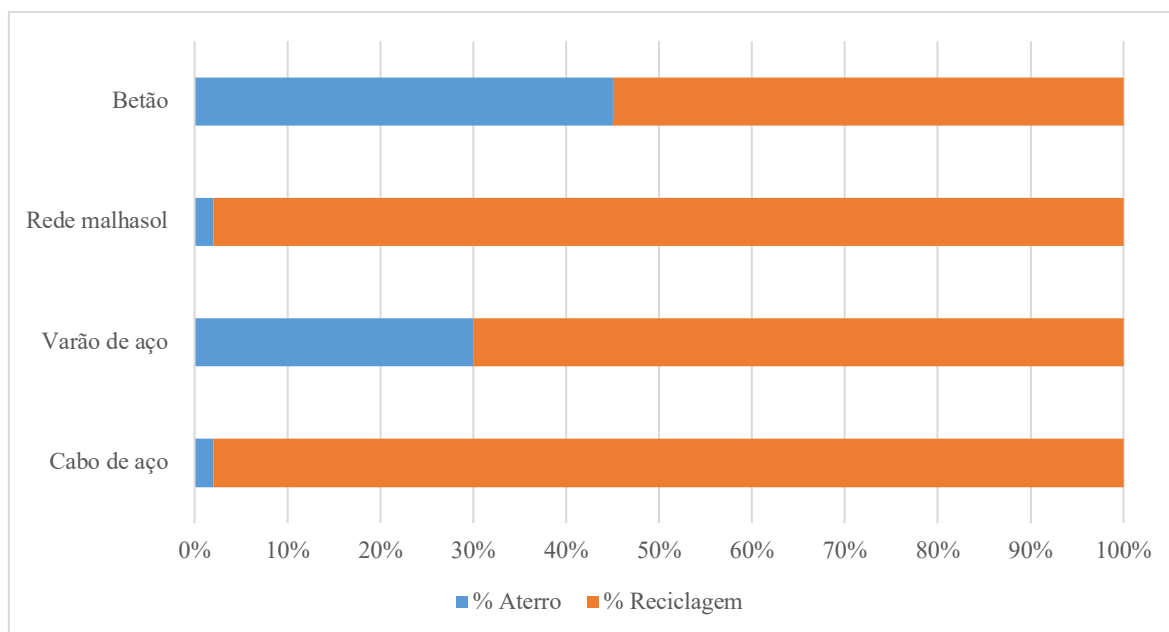


Figura 28-Percentagem atribuída para reciclagem e para aterro dos materiais

Por isso, com base nas informações obtidas na Tabela 5 e 6, é possível calcular a quantidade que será depositada em aterro e a que será reciclada, para o pavilhão novo (Tabela 12) e para o pavilhão existente (Tabela 13).

Tabela 12- Comparação entre a quantidade de material a reciclar e a depositar em aterro na demolição do pavilhão novo

Elementos estruturais e unidades funcionais	Aterro	Reciclagem
Cabo de aço (kg)	1197.49	58676.91
Varão de aço em pilar (kg)	48540.21	113260.49
Rede malhasol no painel (kg)	200.04	9801.96
Betão pré fabricado em vigas (m³)	304.40	372.05
Betão pré fabricado em pilares (m³)	704.25	860.75
Betão pré fabricado em painéis(m³)	236.84	289.47

Tabela 13-Comparação entre a quantidade de material a reciclar e a depositar em aterro na demolição de um pavilhão existente

Elementos estruturais e unidades funcionais	Aterro	Reciclagem
Elemento de fixação ³ (kg)	26.99	1322.27
Varão de aço (kg)	666.28	1554.65
Grout (kg)	52.43	64.04

Como se pode verificar, para ambos, mais de 50% dos resíduos são reciclados, o que reforça a necessidade de se incorporar esses resíduos na composição dos produtos novos.

7.2.1.6. Comparação entre pavilhão novo e pavilhão existente

Por fim é calculada a percentagem de emissões na conceção de um pavilhão novo e a percentagem de emissões geradas no reforço sísmico de um pavilhão existente.

Como se pode observar na Figura 29, para o aquecimento global o valor obtido para o pavilhão novo é 128.5 vezes superior ao do pavilhão existente e para a formação foto-oxidante, este valor é 138.5 vezes superior ao do pavilhão existente. Esta diferença está associada à quantidade de material que é gasta na produção dos elementos pré-fabricados de um edifício novo e na quantidade gasta no reforço sísmico de um pavilhão existente. Assim, a alternativa com menor impacte ambiental é a reabilitação do pavilhão existente.

³ A percentagem de material que será reciclado é igual à do cabo de aço.

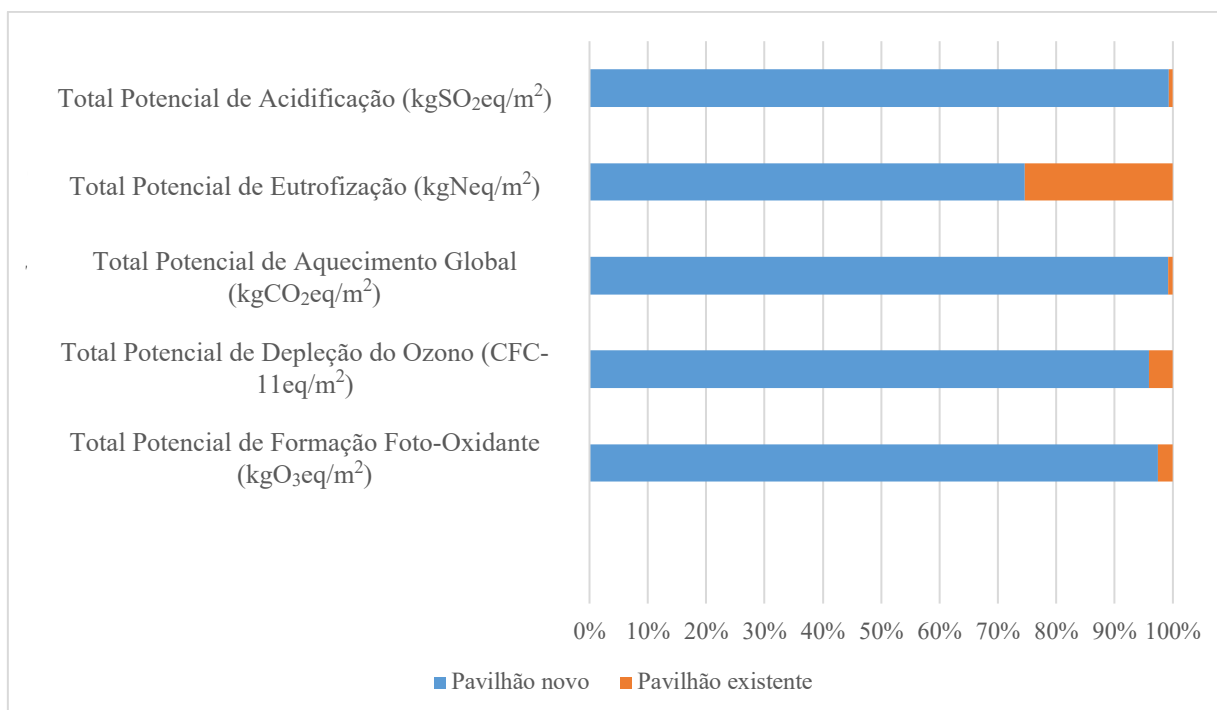


Figura 29-Comparação entre o Pavilhão novo e o pavilhão existente

7.2.2. Custo do ciclo de vida

7.2.2.1. Custo de execução do pavilhão novo

No custo de execução dos pilares e das vigas foram calculados: a quantidade de elementos, o volume unitário, o volume total, o custo unitário, o custo por m³ e o custo total.

Para o caso dos painéis calculou-se a quantidade de elementos, a área, o custo por m², o custo unitário e o custo total. Todos os valores apresentados neste subcapítulo consideram os gastos com os materiais, com a mão de obra e com os equipamentos. No Anexo E é possível encontrar os dados que permitiram obter estes resultados.

Pilares

O custo obtido é apresentado de acordo com a tipologia dos pilares, previamente definidos na Tabela 4.

Tabela 14-Custo total de execução dos pilares

Tipologia	Quantidade (un)	Volume unitário (m³)	Volume total (m³)	Custo unitário (€)	Custo por m³ (€/m³)	Custo total (€)
P1	5	4.9	24.5	1 368.73 €	270.53 €	6 628.05 €
P1A	1	5.48	5.48	1 368.73 €	241.90 €	1 325.61 €
P1B	1	5.48	5.48	1 368.73 €	241.90 €	1 325.61 €
P1C	4	5.08	20.32	1 368.73 €	260.95 €	5 302.44 €
P1D	3	5.48	16.44	1 368.73 €	241.90 €	3 976.83 €
P1E	11	5.58	61.38	1 368.73 €	237.56 €	14 581.71 €
P1F	1	5.48	5.48	1 413.18 €	241.90 €	1 325.61 €
P1G	1	5.08	5.08	1 368.73 €	260.95 €	1 325.61 €
P1H	1	5.48	5.48	1 413.18 €	241.90 €	1 325.61 €
P1J	2	5.58	11.16	1 368.73 €	237.56 €	2 651.22 €
P1K	2	5.58	11.16	1 368.73 €	237.56 €	2 651.22 €
P2	56	4.79	268.24	1 413.18 €	276.75 €	74 234.16 €
P2A	3	5.56	16.68	1 413.18 €	254.17 €	4 239.54 €
P2B	1	5.56	5.56	1 413.18 €	238.42 €	1 325.61 €
P2C	2	5.25	10.5	1 413.18 €	252.50 €	2 651.22 €
P2D	2	5	10	1 413.18 €	265.12 €	2 651.22 €
P2E	1	5.56	5.56	1 413.18 €	238.42 €	1 325.61 €
P2F	1	5.56	5.56	1 413.18 €	238.42 €	1 325.61 €
P3A	4	6.23	24.92	1 368.73 €	212.78 €	5 302.44 €
P3B	4	6.41	25.64	1 368.73 €	206.80 €	5 302.44 €
P3C	3	6.23	18.69	1 368.73 €	212.78 €	3 976.83 €
P3D	2	6.23	12.46	1 368.73 €	212.78 €	2 651.22 €
P3E	1	6.23	6.23	1 368.73 €	212.78 €	1 325.61 €
P3F	1	6.41	6.41	1 368.73 €	206.80 €	1 325.61 €
P3G	12	6.07	72.84	1 368.73 €	218.39 €	15 907.32 €
P3H	3	3.99	11.97	1 325.61 €	332.23 €	3 976.83 €
P4	3	1.14	3.42	517.46 €	151.30 €	517.46 €
Total	131	-----	676.64	36 461.37 €	6 445.05 €	170 458.25 €

Portanto, para os 131 pilares, o custo total de execução é de 170 458. 25 €.

Vigas

O custo unitário das vigas está dividido de acordo com a tipologia deste elemento.

Tabela 15-Custo total de execução das vigas

Tipologia	Quantidade (un)	Volume unitário (m³)	Volume total (m³)	Custo unitário (€)	Custo por m³ (€/m³)	Custo total (€)
VCT1	90	2.7	243	128.93 €	1 547.16 €	139 244.40 €
VCT12	1	2.62	2.62	128.93 €	1 502.03 €	1 502.03 €
VCT19	1	2.62	2.62	128.93 €	1 502.03 €	1 502.03 €
VR1	2	1.16	2.32	115.16 €	990.38 €	1 980.75 €
VR2	10	1.21	12.1	115.16 €	1 381.92 €	13 819.20 €
VR3	8	1.18	9.44	115.16 €	1 381.92 €	11 055.36 €
VSV 36A	45	16.8	756	123.69 €	4 373.68 €	196 815.53 €
VSV 36B	31	16.77	519.87	123.69 €	4 361,31 €	135 200.59 €
VSV 36C	1	17.02	17.02	123.69 €	4 353,89 €	4 353.89 €
Total	189	-----	1564.99	1 103.34 €	21 394,32 €	505 473.79 €

O custo total de execução para as 189 vigas é de 505 473.79 €.

Painéis

De acordo com o CYPE, o custo por área é de 93.95 €/m².

Tabela 16- Custo total de execução dos painéis

Tipologia	Quantidade (un)	Área (m²)	Custo por m² (€/m²)	Custo unitário (€)	Custo total (€)
Painel 1	1	1	93.95 €	93.95 €	93.95 €
Painel2	1	1	93.95 €	93.95 €	93.95 €
Painel 3	1	2	93.95 €	187.90 €	187.90 €
Painel 4	17	2	93.95 €	187.90 €	3 194.30 €
Painel 5	19	2	93.95 €	187.90 €	3 570.10 €
Painel 6	17	2	93.95 €	187.90 €	3 194.30 €
Painel 7	1	2	93.95 €	187.90 €	187.90 €
Painel 8	1	3	93.95 €	281.85 €	281.85 €
Painel 9	1	3	93.95 €	281.85 €	281.85 €
Painel 10	2	3	93.95 €	281.85 €	563.70 €
Painel 11	1	3	93.95 €	281.85 €	281.85 €
Painel 12	2	4	93.95 €	375.80 €	751.60 €
Painel 13	1	4	93.95 €	375.80 €	375.80 €
Painel 14	1	4	93.95 €	375.80 €	375.80 €
Painel 15	1	4	93.95 €	375.80 €	375.80 €
Painel 16	2	5	93.95 €	469.75 €	939.50 €

Painel 17	1	7	93.95 €	657.65 €	657.65 €
Painel 18	1	7	93.95 €	657.65 €	657.65 €
Painel 19	2	8	93.95 €	751.60 €	1 503.20 €
Painel 20	1	9	93.95 €	845.55 €	845.55 €
Painel 21	1	11	93.95 €	1 033.45 €	1 033.45 €
Painel 22	1	12	93.95 €	1 127.40 €	1 127.40 €
Painel 23	1	12	93.95 €	1 127.40 €	1 127.40 €
Painel 24	1	16	93.95 €	1 503.20 €	1 503.20 €
Painel 25	1	17	93.95 €	1 597.15 €	1 597.15 €
Painel 26	1	18	93.95 €	1 691.10 €	1 691.10 €
Painel 27	1	19	93.95 €	1 785.05 €	1 785.05 €
Painel 28	4	20	93.95 €	1 879.00 €	7 516.00 €
Painel 29	1	21	93.95 €	1 972.95 €	1 972.95 €
Painel 30	2	22	93.95 €	2 066.90 €	4 133.80 €
Painel 31	2	22	93.95 €	2 066.90 €	4 133.80 €
Painel 32	1	23	93.95 €	2 160.85 €	2 160.85 €
Painel 33	1	26	93.95 €	2 442.70 €	2 442.70 €
Painel 34	1	27	93.95 €	2 536.65 €	2 536.65 €
Painel 35	1	28	93.95 €	2 630.60 €	2 630.60 €
Painel 36	1	28	93.95 €	2 630.60 €	2 630.60 €
Painel 37	1	28	93.95 €	2 630.60 €	2 630.60 €
Painel 38	1	29	93.95 €	2 724.55 €	2 724.55 €
Painel 39	1	29	93.95 €	2 724.55 €	2 724.55 €
Painel 40	1	29	93.95 €	2 724.55 €	2 724.55 €
Painel 41	5	31	93.95 €	2 912.45 €	14 562.25 €
Painel 42	3	31	93.95 €	2 912.45 €	8 737.35 €
Painel 43	1	33	93.95 €	3 100.35 €	3 100.35 €
Painel 44	1	33	93.95 €	3 100.35 €	3 100.35 €
Painel 45	11	33	93.95 €	3 100.35 €	34 103.85 €
Painel 46	1	34	93.95 €	3 194.30 €	3 194.30 €
Painel 47	1	34	93.95 €	3 194.30 €	3 194.30 €
Painel 48	1	35	93.95 €	3 288.25 €	3 288.25 €
Painel 49	1	36	93.95 €	3 382.20 €	3 382.20 €
Painel 50	1	37	93.95 €	3 476.15 €	3 476.15 €
Painel 51	1	37	93.95 €	3 476.15 €	3 476.15 €
Painel 52	1	37	93.95 €	3 476.15 €	3 476.15 €
Painel 53	1	39	93.95 €	3 664.05 €	3 664.05 €
Painel 54	1	41	93.95 €	3 851.95 €	3 851.95 €
Painel 55	4	42	93.95 €	3 945.90 €	15 783.60 €
Painel 56	1	42	93.95 €	3 945.90 €	3 945.90 €

Painel 57	3	43	93.95 €	4 039.85 €	12 119.55 €
Painel 58	2	44	93.95 €	4 133.80 €	8 267.60 €
Painel 59	1	45	93.95 €	4 227.75 €	4 227.75 €
Painel 60	1	45	93.95 €	4 227.75 €	4 227.75 €
Painel 61	1	46	93.95 €	4 321.70 €	4 321.70 €
Painel 62	1	46	93.95 €	4 321.70 €	4 321.70 €
Painel 63	1	47	93.95 €	4 415.65 €	4 415.65 €
Total	144	-----	-----	131 905.80 €	225 480.00 €

O custo total de execução dos painéis é de 225 480.00 €.

Por isso, contabilizando o custo dos pilares, das vigas e dos painéis, conclui-se que o custo total de execução dos elementos pré-fabricados é de 901 412.04 € (Tabela 17).

Tabela 17- Custo total de execução dos elementos pré-fabricados do edifício

Elemento	Custo total (€)
Pilar	170 458.25 €
Viga	505 473.79 €
Painel	225 480.00 €
Total	901 412.04 €

7.2.2.2. Custo de demolição do pavilhão novo

Para calcular os custos de demolição foram introduzidos os dados indicados na Figura 30 no gerador de preços do software CYPE.

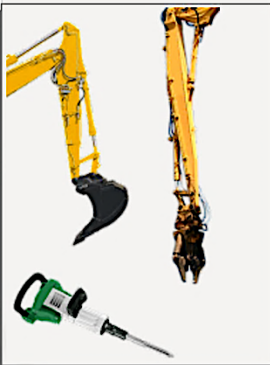
Edifício a demolir		Tipo de demolição	
Pisos acima da rasante	1	<input type="radio"/> Elemento a elemento <input type="radio"/> Através de escavadora rotativa sobre correntes com tesoura <input checked="" type="radio"/> Combinada	
Pisos abaixo da rasante	0		
Altura acima da rasante (m)	6.00		
Profundidade abaixo da rasante (m)	0.00		
Superfície total (m²)	34614.42		
Tipo de estrutura a demolir			
<input type="radio"/> De alvenaria de pedra <input type="radio"/> De alvenaria <input type="radio"/> Metálica <input checked="" type="radio"/> De betão			
Estado de conservação			
<input type="radio"/> Normal <input checked="" type="radio"/> Médio <input type="radio"/> Deficiente <input type="radio"/> Ruinoso			
Tipo de edifício <input checked="" type="radio"/> Isolado <input type="radio"/> Com uma edificação contígua e/ou com parede meeira <input type="radio"/> Com duas ou mais edificações contíguas e/ou com paredes meeiras			

Figura 30- Dados considerados no cálculo da demolição de um edifício⁴

Portanto, para os dados considerados, o custo total da demolição do edifício é de 1 184 367.00 €, obtendo-se um custo por m² de 34.22 € (Tabela 18).

Tabela 18- Custo total da demolição de um edifício

Custo total (€)	1 184 367.00 €
Preço por m²	34.22 €

Para o cálculo da quantidade de resíduos de demolição dos elementos estruturais pré-fabricados do edifício, após o fim da sua vida útil, recorreu-se aos valores obtidos através do relatório produzido pelo Tally. Desta forma, na Tabela 19 consta o somatório dos resíduos provenientes da demolição dos pilares, das vigas e dos painéis de tamponamento.

⁴ Note-se que a altura da rasante é de 13 m, porém o CYPE só permite introduzir uma altura máxima de 6 m.

Tabela 19-Resíduos gerados contabilizando a demolição de elementos pré-fabricados (Tally)

Código LER	Tipo	Peso (kg)
17 01 01	Betão (betões e pré-fabricados).	6 326 646.50
17 04 07	Mistura de metais.	321 677.10
Resíduos gerados:		6 648 323.60

Assim, dado que já se obteve o custo total da demolição do edifício (Tabela 18) e a respetiva quantidade de resíduos gerados (Anexo E), com base na Tabela 19 é possível calcular somente o custo de demolição de elementos pré-fabricados (Tabela 20).

Tabela 20-Custo da demolição dos elementos pré-fabricados

Custo total (€)	205 083.88 €
Preço por m²	5.92 €

7.2.2.3. Custo de reforço sísmico e demolição do pavilhão existente

Tal como foi referido, o custo do reforço sísmico foi efetuado considerando as quantidades obtidas no Tally, dado que a diferença é inferior a 3%. Os materiais mencionados foram retirados do CYPE e da biblioteca OOCC. Algumas medidas, foram reajustadas à dimensão do pavilhão.

Para o cálculo do custo do reforço sísmico é considerado:

- Ligação viga-viga
- Ligação viga-pilar
- Ligação painel-pilar

Ligação viga-viga

O CYPE permite colocar varões com comprimento máximo de 0.41 m. Porém, perante as dimensões do pavilhão este comprimento é demasiado pequeno, pelo que, é necessário aumentá-lo. Assim, vai-se considerar que o comprimento do varão é 3.1 vezes maior, ou seja, igual a 1.26 m (Tabela 21).

Tabela 21- Custo total dos varões da ligação viga-viga

Tipologia	Diâmetro (mm)	Quantidade (un)	Comprimento (m)	Massa por metro (kg/m)	Massa por elemento (kg)	Peso total (kg)	Custo por varão (€)	Custo total (€)
Varões (Viga-Viga)	20	215	1.26	2.47	3.11	669.52	245.20 €	52 718.11 €

Para fixar os varões é necessário utilizar uma argamassa resistente. Por isso, optou-se pelo uso de uma argamassa de alto desempenho, com resistência às vibrações e aos impactos (Tabela 22). O cálculo detalhado do custo total da argamassa, encontra-se no Anexo E.

Tabela 22-Custo total do Grout

Elemento	Quantidade (un)	Área de corte (m²)	Quantidade de argamassa por corte (kg/corte)	Quantidade total de argamassa (kg)	Custo por embalagem de argamassa (€)	Rendimento (kg)	Custo total (€)
Grout	215	0.001075	0.54	116.510	16.53	2	962.95 €

Dado que esta ação será realizada a certa altura, é necessário incluir o preço de uma cesta elevatória, desta forma, considera-se que para efetuar cada ligação demora-se 50 minutos (Tabela 23).

Tabela 23- Custo do equipamento na colocação dos varões

Elemento	Processo	Preço unitário (€)	Quantidade (un)	Importância	Total (€)
Aluguer diário de cesta elevatória de braço articulado, motor diesel, de 25 m de altura máxima de trabalho	Colocação do varão	237.66 €	215	24.76 €	5 322.59 €

Assim, a ligação viga-viga apresenta um custo total de 59 003.65 €.

Ligação viga-pilar

A ligação viga-pilar é efetuada através duma ancoragem mecânica de um perfil laminado da série L, numa viga e num pilar. O preço inclui os parafusos, os cortes, os desperdícios, a mão

de obra e pequenos equipamentos. Na Tabela 24 apresenta-se o custo dos elementos de fixação. As informações referentes ao peso destes elementos constam no Anexo E.

Tabela 24-Custo do elemento de fixação ligação viga-pilar

Tipologia	Quantidade (un)	Peso por peça (kg/peça)	Peso total (kg)	Custo por peça (€/peça)	Custo total (€)
Elemento fixação pilar-viga	820	1.004	823.28	2.49 €	2 041.83 €

Agora calcula-se o preço por varão de ligação. Tendo em conta a dimensão do pavilhão, considera-se que o comprimento do varão é de 1.5 m (Tabela 25).

Tabela 25-Custo dos varões de ligação

Tipologia	Diâmetro (mm)	Quantidade (un)	Comprimento (m)	Massa por metro (kg/m)	Peso total (kg)	Custo por kg (€/kg)	Custo total (€)
Varões (Viga-Pilar)	20	406	1.5	2.47	1551.86	0.785	1 218.21 €

Porém, o valor apresentado na Tabela 25 não considera a mão de obra e o equipamento, portanto, ao considerar que a colocação dos varões pelos operários demora 20 minutos e a utilização da cesta elevatória demora 50 minutos, obtém-se os valores apresentados na Tabela 26 e 27.

Tabela 26- Custo da mão de obra na colocação dos varões

Mão de Obra	Preço por hora (€/h)	Importância (€)	Quantidade (un)	Custo total (€)	Total (€)
Oficial 1º estruturista	19.31	6.44 €	406	2 613.29 €	5 027.63 €
Operário especializado construção	17.84	5.95 €	406	2 414.35 €	

Tabela 27- Custo do equipamento na colocação dos varões

Elemento	Processo	Preço unitário (€)	Quantidade (un)	Importância	Total (€)
Aluguer diário de cesta elevatória de braço articulado, motor diesel, de 25 m de altura máxima de trabalho	Colocação do cabo	237.66 €	406	24.76 €	10 051.04 €

Vale salientar que a utilização da cesta elevatória destina-se também para a ancoragem mecânica dos elementos de fixação, dado que o CYPE não considera a utilização de equipamentos de elevação. Assim, conclui-se que o custo da ligação viga-pilar é de 18 338.71 €.

Ligação painel-pilar

Para finalizar o reforço é necessário considerar a ligação painel-pilar. Esta conexão é efetuada através de uma ancoragem mecânica de um perfil laminado da série L, num painel e num pilar, simultaneamente. O preço inclui os parafusos, os cortes, os desperdícios, os elementos auxiliares de montagem e a mão de obra. Na Tabela 28 e 29 apresentam-se os custos dos elementos de fixação e o custo do aluguer da cesta elevatória, considerando que a colocação de cada elemento, demora 10 minutos.

Tabela 28- Custo do elemento de fixação ligação viga-pilar

Tipologia	Quantidade (un)	Peso por peça (kg/peça)	Peso total (kg)	Custo por peça (€/peça)	Custo total (€)
Elemento fixação Painel-pilar	1572	0.402	631.94	0.98 €	1 541.94 €

Tabela 29- Custo do equipamento na colocação dos elementos de fixação

Elemento	Processo	Preço unitário (€)	Quantidade (un)	Importância	Total (€)
Aluguer diário de cesta elevatória de braço articulado, motor diesel, de 25 m de altura máxima de trabalho	Colocação do cabo	237.66 €	1572	4.95 €	7 783.37 €

O custo total da ligação painel-pilar é de 9 325.31 €.

Custo Total

Na Tabela 30 é apresentado o custo total do reforço sísmico no pavilhão existente.

Tabela 30-Custo total do reforço sísmico

Custo total (€)	86 667.67 €
Preço por m²	2.50 €

Dado que após o período de vida útil do edifício, este será demolido, e considerando que o pavilhão industrial existente tem as mesmas características que o pavilhão industrial novo, o custo da demolição é igual ao que foi apresentado na Tabela 20. Assim, o custo do reforço sísmico e da demolição dos elementos pré-fabricados do edifício existente é apresentado na Tabela 31.

Tabela 31-Custo total do reforço sísmico e da demolição do pavilhão existente

Custo total (€)	291 751.46 €
Preço por m²	8.43 €

7.2.2.4. Comparação entre pavilhão novo e pavilhão existente

Para efetuar comparações de custos ao longo do ciclo de vida, o indicador mais utilizado é o VAL. No entanto, dado que se está a considerar períodos de vida útil diferentes não é correto usar este indicador. Além disso, não se possuem dados, de acordo com o trabalho desenvolvido, que permitam aplicar qualquer outro indicador económico (apresentados no Anexo B), dado que no caso de estudo, como se trata de estruturas pré-fabricadas de betão considerou-se não necessitarem de intervenções de manutenção durante as respetivas vidas úteis (50 e 20 anos respetivamente, para a construção nova do pavilhão e para o reforço sísmico do pavilhão existente) nem estão previstos quaisquer ganhos ao longo das VUE. Assim, é apenas possível efetuar uma comparação entre o custo do pavilhão novo e o custo do pavilhão existente, através do respetivo valor global e do valor por metro quadrado. Na Tabela 32 é apresentado o custo total dos dois pavilhões.

Tabela 32-Comparação entre o pavilhão novo e o pavilhão existente

Tipologia	Custo total (€)	Preço por m ²
Pavilhão novo	1 106 495.92 €	34.22 €
Pavilhão existente	291 751.46 €	8.43 €

O custo do pavilhão novo corresponde à soma do custo de demolição e o custo de construção para um período de vida útil de 50 anos, enquanto que o custo do pavilhão existente corresponde à soma do custo de demolição e do custo do reforço sísmico para um período de vida útil de 20 anos.

No pavilhão novo, a fase com maior custo corresponde à de execução e montagem dos elementos estruturais pré-fabricados e no pavilhão existente, a fase com maior custo é a de demolição. Como a ação de demolição é efetuada em períodos de vida útil distintos, seria expectável que os custos associados fossem diferentes, porém, pelo facto de não haver projeções para um período de vida útil tão elevado, nem previsão fiável de taxas de juro e de taxas de inflação, considerou-se o mesmo valor para o custo da demolição em ambos os casos. Assim, com base nos valores obtidos pode-se constatar que o custo do pavilhão novo é 3.79 vezes superior ao custo do pavilhão existente (Figura 31).

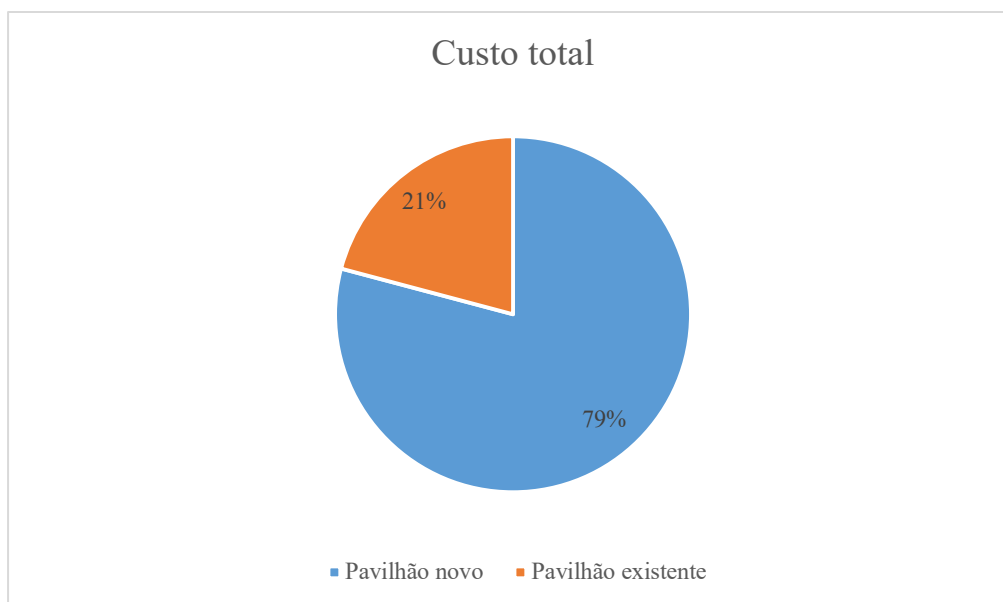


Figura 31-Percentagem de gastos no pavilhão novo e no pavilhão existente

Portanto, conclui-se, comparando todos os valores calculados, que é preferível realizar um reforço sísmico no pavilhão existente, do que construir um pavilhão novo, quer no que

respeita ao impacto ambiental quer no que respeita aos aspetos económicos. Efetuando preventivamente o reforço sísmico de pavilhões industriais com as características dos estudados, evitam-se além de elevados prejuízos ambientais, danos estruturais e consequentemente possíveis danos humanos e económicos. Estes envolvem não só danos materiais mas também prejuízos económico-financeiros decorrentes da interrupção da atividade industrial pelo tempo necessário para avaliar a segurança estrutural da instalação e para a reparar ou construir uma nova. Releva-se ainda o facto de que apesar da VUE de um edifício ser de 50 anos, não significa que o mesmo seja demolido nessa data, pois pode, desde que sujeito a operações de reabilitação e manutenção, permanecer em utilização por um período de tempo mais longo.

Capítulo 8

Considerações finais

Capítulo 8. Considerações finais

8.1 Conclusões

8.2 Desenvolvimentos futuros

Capítulo 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Conclusões

O setor da construção é responsável por uma significativa parcela global de impactos ambientais, económicos e sociais, e como tal, o atual modelo de construção tem ameaçado os recursos naturais de tal forma que, caso não se altere o comportamento, as gerações futuras não conseguirão ter recursos para satisfazer as suas necessidades.

Nos últimos anos foram feitos grandes esforços no intuito de promover o uso eficiente da energia em edifícios durante a fase de exploração, porém, já se apercebeu que a redução do consumo energético não é suficiente para colmatar os problemas. É necessário também reduzir o uso de recursos e a energia incorporada dos materiais, de forma a minimizar as emissões de gases.

Desta forma, a integração do BIM-ACV tem ganho maior destaque. O uso do BIM revelou-se importante, pois permite reduzir a perda de informação, facilita a comunicação entre os vários intervenientes do projeto, minimiza o erro, o custo e o tempo do projeto. Quando se integra a ACV na metodologia BIM, a complexidade é reduzida, permitindo avaliar todas as soluções alternativas e corrigir eventuais erros na fase inicial do projeto. O BIM-ACV permite ainda a simulação de diversas alternativas num ambiente único, aumentando assim, a capacidade de alcançar um resultado mais económico e com um desempenho ambiental favorável. Apesar de ser vantajosa, o BIM é uma metodologia pouco utilizada, principalmente no mercado português, devido ao elevado custo de implementação e de formação de profissionais.

No presente trabalho, pretendeu-se avaliar o Ciclo de Vida do reforço sísmico de estruturas pré-fabricadas de betão armado com recurso ao BIM. Isto porque, todos os anos, os sismos causam perdas humanas, económicas e impactos ao meio ambiente, pelo que é preciso adotar uma atitude pró-ativa para que as estruturas resistam à ação dos mesmos sem sofrerem danos. Assim, perante grandes eventos, a robustez e resiliência das estruturas são fundamentais para minimizar os danos e possibilitar uma rápida recuperação das atividades quotidianas.

Na Europa, uma grande parte dos edifícios antigos não cumpre os atuais requisitos estruturais e funcionais, tornando a situação mais crítica nas regiões propensas a eventos sísmicos.

Assim, esta dissertação teve como objetivo analisar os custos e os impactes ambientais associados ao reforço sísmico e à demolição dos elementos pré-fabricados de um edifício existente e compará-los com os custos e impactes ambientais da construção e demolição de elementos pré-fabricados de betão armado de uma construção nova, com características similares. Dado que existem estruturas cuja segurança face às ações sísmicas é inferior aos atuais níveis de exigência, este trabalho pretendeu demonstrar que a reabilitação estrutural com reforço sísmico pode garantir o desempenho funcional do edifício durante toda a sua vida útil sem pôr em causa a segurança da estrutura e dos seus utilizadores.

Em relação à análise do ciclo de vida, este estudo foi condicionado pela escassez de materiais na base de dados do Tally. Como tal, é expectável que alguns valores obtidos possam diferir dos valores reais. Para além disso, a ferramenta não efetua o cálculo dos impactes ambientais aquando da demolição do edifício novo e do edifício existente. Assim sendo, caso se considere os valores dos impactes ambientais da demolição do pavilhão novo e do pavilhão existente, os impactes ambientais totais serão maiores do que os valores apresentados.

No cálculo de custo do ciclo de vida, constatou-se incertezas entre a previsão de custos de execução e demolição dos elementos pré-fabricados e dos custos de reforço sísmico, relativamente, aos custos reais de cada um dos casos. De facto, no caso da demolição, por ser realizada em períodos distintos, não foi contabilizada a taxa de inflação porque para além de não haver projeções para um período de vida útil tão elevado (50 anos), não há dados suficientes para aplicar outros métodos de avaliação económica.

Da análise ACV e CCV conclui-se que a solução mais vantajosa é a de reabilitação do edifício existente, dado que, os impactes ambientais são significativamente reduzidos (na reabilitação do edifício diminui-se até 128.5 vezes as emissões de CO₂) e os custos são 3.79 vezes inferiores aos custos da construção nova. Para além disso, como a fase com maior impacto é a de produção, reforça-se a importância da reabilitação, já que a melhoraria das condições existentes tem um menor impacto do que demolir para construir um novo. Efetuando preventivamente o reforço sísmico de pavilhões industriais com as características dos estudados, evitam-se, além de elevados prejuízos ambientais, danos estruturais e, consequentemente possíveis danos humanos e económicos. Estes envolvem não só os relativos a danos materiais mas também a prejuízos económico-financeiros decorrentes da interrupção da atividade industrial pelo tempo necessário para avaliar a segurança estrutural da instalação e para a reparar ou construir uma nova. Além disto, o reforço sísmico permite

a recuperação do desempenho funcional do edifício e garante uma maior durabilidade dos elementos estruturais.

8.2.Desenvolvimentos futuros

Tal como foi frisado, o presente estudo da ACV apresenta algumas limitações, sendo a maior, a impossibilidade de incluir materiais reciclados nos elementos estruturais.

Estima-se que o sector da construção produza anualmente 850 Mton de resíduos provenientes da construção e da demolição (RCD) (Soares *et al.*, 2014).

Quando a vida útil do edifício termina, a sua demolição origina quantidades significativas de resíduos de betão, no entanto, a sua reciclagem e reutilização como agregados podem reduzir a quantidade de RCD em aterros, a extração de agregados naturais e os respetivos impactes ambientais (Estanqueiro *et al.*, 2018).

Os RCD para além de ocuparem espaço em aterros, podem trazer impactos maiores como o assoreamento dos rios e lagos ou desperdício de materiais valiosos.

Em países como a Holanda e a Dinamarca, mais de 90% dos resíduos provenientes da construção e demolição são reciclados. Em Portugal, apenas 5% desses resíduos são reciclados. Esta discrepância deve-se à existência de leis que regulam a reutilização e a reciclagem, bem como, impõem taxas elevadas para a deposição de resíduos em aterros (Soares *et al.*, 2014).

Portanto, uma proposta de trabalho futuro seria analisar a ACV, através da abordagem *cradle-to-cradle*, de um edifício que contenha elementos estruturais pré-fabricados com adição de materiais reciclados e comparar com um edifício similar, com elementos pré-fabricados sem adição de materiais reciclados, de forma a observar as diferenças.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd Rashid, A. F. and Yusoff, S. (2015) ‘A review of life cycle assessment method for building industry’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 45, pp. 244–248. doi: 10.1016/j.rser.2015.01.043.

ABNT (2004) *A Avaliação do Ciclo de Vida (ISO 14040)*. Available at: <https://ciclodevida.wordpress.com/glossario/> (Accessed: 30 June 2019).

Aljundi K. (2017) ‘Is BIM an effective methodology to integrate LCA in buildings design?’. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Aveiro.

Almeida, I. (2018) ‘Análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários’. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Aveiro.

Anand, C. K. and Amor, B. (2017) ‘Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 67, pp. 408–416. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.058.

Andrade, T. F. R. (2013) ‘Integração da análise ciclo de vida nas práticas de projetos de edificios’. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de mestre, p. 222, Porto.

Anthonissen, J., Braet, J. and Den, W. Van (2015) ‘Life cycle assessment of bituminous pavements produced at various temperatures in the Belgium context’, *Transportation Research Part D*. Elsevier Ltd, 41, pp. 306–317. doi: 10.1016/j.trd.2015.10.011.

Antón, L. Á. and Díaz, J. (2014) ‘Integration of life cycle assessment in a BIM environment’, *Procedia Engineering*, 85, pp. 26–32. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.525.

Arrigoni, A. *et al.* (2018) 'Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier, 137(March), pp. 11–20. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.05.025.

Asdrubali, F. *et al.* (2017) 'A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications', *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 114, pp. 307–332. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.033.

Asdrubali, F., Baldassarri, C. and Fthenakis, V. (2013) 'Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings', *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 64, pp. 73–89. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.04.018.

Balasbaneh, A. T. and Bin Marsono, A. K. (2017) 'Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions', *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 124, pp. 357–368. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.025.

Blengini, G. A. and Garbarino, E. (2010) 'Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 18(10–11), pp. 1021–1030. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.01.027.

Bournas, D. A., Negro, P. and Taucer, F. F. (2014) 'Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening', *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(5), pp. 2383–2404. doi: 10.1007/s10518-013-9466-z.

Bragança, L. and Mateus, R. (2012)' *Life-cycle analysis of buildings : environmental impact of building elements*'. Published by Physics and Technology of Construction Laboratory of University of Minho, Braga.

Brás, A. and Faria, P. (2017) 'Effectiveness of mortars composition on the embodied carbon long-term impact', *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 154, pp. 523–528. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.026.

Brás, A. and Gomes, V. (2015) 'LCA implementation in the selection of thermal enhanced mortars for energetic rehabilitation of school buildings', *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 92, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.007.

Brundtland, G. (1987) 'Brundtland Report: Our Common Future', *World Commission on Environment and Development*.

Bui, Q.-B. *et al.* (2019) 'Vertical Rods as a Seismic Reinforcement Technique for Rammed Earth Walls: An Assessment', *Advances in Civil Engineering*, 2019, pp. 1–12. doi: 10.1155/2019/1285937.

BuildingSmart (2019) *Industry Foundation Classes (IFC) - BuildingSmart Technical*. Available at: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/> (Accessed: 30 June 2019).

Cabeza, L. F. *et al.* (2014) 'Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 29, pp. 394–416. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.

Waterhouse, R. *et al.* (2017) 'National BIM Report 2017'. Published by NBS. doi: 10.1016/j.jasms.2010.02.001.

Choi, S. W. *et al.* (2016) 'Sustainable design model to reduce environmental impact of building construction with composite structures', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 137, pp. 823–832. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.174.

Ciambrone, D. F. (1997) *Environmental Life Cycle Analysis*. Lewis, Boca Raton, New York: CRC Press. doi: 10.1201/9780203757031.

Comission E. (2017) ‘The Energy Performance’, *Context*, (95), pp. 1–6. Published by European Commission. doi: 10.1109/COMST.2018.2846401.

Demertzi, M. *et al.* (2017) ‘Environmental performance of expanded cork slab and granules through life cycle assessment’, *Journal of Cleaner Production*, 145, pp. 294–302. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.071.

Dinis Silvestre, J., de Brito, J. and Duarte Pinherio, M. (2013) ‘LCA “From Cradle-to-Cradle” of Energy-Related Building Assemblies: Promoting Eco-Efficient Materials’, *Conference: Portugal SB13 - Contribution of Sustainable Building for EU 20-20-20 Targets*, (January). doi: 10.13140/RG.2.1.1664.6167.

DL n.º 66/2019 de 21 de Maio (2019) ‘Regime jurídico da reabilitação urbana’, pp. 1–31.

Dowsett, R. and Harty, C. (2013) ‘Evaluating the Benefits of Bim for Sustainable Design—a Review.’, *29th Annual ARCOM Conference*, (September), pp. 13–23. Available at: http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2013-0013-0023_Dowsett_Harty.pdf.

Dylewski, R. and Adamczyk, J. (2016) ‘The environmental impacts of thermal insulation of buildings including the categories of damage: A Polish case study’, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 137, pp. 878–887. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.172.

Eastman, C. *et al.* (2008) ‘BIM Tools and Parametric Modeling’, in *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*.

Eastman, C. M. (2011) *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. Wiley. Available at: https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=aCi7Ozwkoj0C&oi=fnd&pg=PP7&dq=BIM+handbook+a+guide+to+building+information+modeling+for+owners,+managers,+designers,+engineers+and+contractors&ots=ZbE7HSG5Bn&sig=gGOoWRVPiXZBhj1rEqJ6mLua3F0&redir_esc=y#v=onepage&q=BIM+handbook+a+guide+to+building+information+modeling+for+owners%2C+managers%2C+designers%2C+engineers+and+contractors&f=false (Accessed: 30 June 2019).

Eleftheriadis, S., Mumovic, D. and Greening, P. (2017) ‘Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 67, pp. 811–825. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.028.

EN 15643-4 (2015). ‘Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação da sustentabilidade dos edifícios - Parte 4: Enquadramento para a avaliação do desempenho económico’.

EPA (2012) ‘Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts (TRACI) User ’ s Guide’, (July).

Estanqueiro, B. *et al.* (2018) ‘Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete’, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Taylor & Francis, 22(4), pp. 429–449. doi: 10.1080/19648189.2016.1197161.

Ferreira, J., Duarte Pinheiro, M. and De Brito, J. (2015) ‘Economic and environmental savings of structural buildings refurbishment with demolition and reconstruction - A Portuguese benchmarking’, *Journal of Building Engineering*. Elsevier, 3, pp. 114–126. doi: 10.1016/j.jobbe.2015.07.001.

Galan-Marin, C., Rivera-Gomez, C. and Garcia-Martinez, A. (2016) 'Use of natural-fiber bio-composites in construction versus traditional solutions: Operational and embodied energy assessment', *Materials*, 9(6). doi: 10.3390/ma9060465.

Gaspar, P. L. and Santos, A. L. (2015) 'Embodied energy on refurbishment vs. demolition: A southern Europe case study', *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 87, pp. 386–394. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.040.

Gervásio, H. (2013) 'Communication from the Commission to the European Parliament and the Council: Building the Single Market for Green Products', *Brussels, Belgium*. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0196&from=en>.

Ghaffarianhoseini, Ali *et al.* (2017) 'Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(October 2015), pp. 1046–1053. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.083.

Ghaffarianhoseini, Amirhosein *et al.* (2016) 'What is an intelligent building? Analysis of recent interpretations from an international perspective', *Architectural Science Review*. doi: 10.1080/00038628.2015.1079164.

Giesekam, J. and Pomponi, F. (2017) 'Briefing: Embodied carbon dioxide assessment in buildings: guidance and gaps', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 171(7), pp. 334–341. doi: 10.1680/jensu.17.00032.

Giesekam, J., Densley-Tingley D. and Barrett J. (2016) 'Building on the Paris Agreement : making the case for embodied carbon intensity targets in construction . Press, U. K. I.'

Guardigli, L., Monari, F. and Bragadin, M. A. (2011) 'Assessing environmental impact of green buildings through LCA methods: A comparison between reinforced concrete and wood structures in the European context', *Procedia Engineering*, 21, pp. 1199–1206. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2131.

Hafner, A. and Schäfer, S. (2018) 'Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level', *Journal of Cleaner Production*, 167, pp. 630–642. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.203.

Hossain, M. U. and Ng, S. T. (2018) 'Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review', *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.120.

Hoxha, E. *et al.* (2017) 'Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability', *Journal of Cleaner Production*, 144, pp. 33–47. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.068.

Hu, M. (2018) 'Dynamic life cycle assessment integrating value choice and temporal factors—A case study of an elementary school', *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 158, pp. 1087–1096. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.043.

IPCC (2014) '*Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III ... - Intergovernmental Panel on Climate Change - Google Livros*'. Available at: <https://books.google.pt/books?id=jrUNCgAAQBAJ&pg=PT99&lpg=PT99&dq=TS.3.2.4+Buildings+15+GHG+emissions+from+the+buildings+secto+r+have+more+than+dou+bled+since+1970,+accounting+for+19+%25+of+global+GHG+emissions+in+2010,+including+indirect+emissions+from+> (Accessed: 1 July 2019).

ISO 14040 (2006) 'Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ICS 13.020.60-10', 2006, p. 20.

ISO 15686-5 (2017) ‘Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing’, 2017.

Jalaei, F., Zoghi, M. and Khoshand, A. (2019) ‘Life cycle environmental impact assessment to manage and optimize construction waste using Building Information Modeling (BIM)’, *International Journal of Construction Management*. Taylor & Francis, 0(0), pp. 1–18. doi: 10.1080/15623599.2019.1583850.

Ji, C. *et al.* (2016) ‘Establishing environmental benchmarks to determine the environmental performance of elementary school buildings using LCA’, *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 127, pp. 818–829. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.042.

Kumanayake, R. and Luo, H. (2018) ‘A tool for assessing life cycle CO₂ emissions of buildings in Sri Lanka’, *Building and Environment*. Elsevier, 128(November 2017), pp. 272–286. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.042.

Kurda, R., de Brito, J. and Silvestre, J. D. (2019) ‘CONCRETop method: Optimization of concrete with various incorporation ratios of fly ash and recycled aggregates in terms of quality performance and life-cycle cost and environmental impacts’, *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.070.

Kymmell, W. (2008) ‘*Building information modelling: Planning and managing construction projects with 4D CAD and simulations*’, McGraw-Hill. doi: 10.5209/rev_ARIS.2014.v26.n2.41469.

Lee, G., Park, H. K. and Won, J. (2012) ‘D3City project - Economic impact of BIM-assisted design validation’, in *Automation in Construction*. doi: 10.1016/j.autcon.2011.12.003.

Lima, B. (2012) ‘Definição de Indicadores para Monitorização de Concessões’. Dissertação apresentada ao Técnico de Lisboa para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil sob a orientação de Carlos Paulo Oliveira da Silva Cruz, Lisboa'

Lu, Y. *et al.* (2017) 'Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions', *Automation in Construction*. Elsevier, 83(February), pp. 134–148. doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.024.

Luo, W., Sandanayake, M. and Zhang, G. (2019) 'Direct and indirect carbon emissions in foundation construction – Two case studies of driven precast and cast-in-situ piles', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 211, pp. 1517–1526. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.244.

Maia, J. (2013) 'Avaliação do Ciclo de Vida de Soluções de Reabilitação Energética de Fachadas', p. 118. Dissertação apresentada na Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Porto.

Manso, M. *et al.* (2018) 'Life cycle analysis of a new modular greening system', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 627, pp. 1146–1153. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.198.

Marteinsson, B. (2005) '*Service life estimation in the design of buildings*'. Doctoral thesis, Sweden'.

Martins, J. (2009) 'Modelação do Fluxo de Informação no Processo de Construção', *Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil*, pp. 1–461, Porto.

Mateus, R. (2009) 'Avaliação da Sustentabilidade da Construção: propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis', *Dissertação apresentada à Universidade do Minho para a obtenção de grau de Doutor em Engenharia Civil*, p. 427.

Matos, J. (2017) 'Life Cycle Cost, as a Tool for Decision Making on Concrete Infrastructures'. Dissertação apresentada na Universidade do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Braga.

Matos, R. (2016) ‘Building Life Cycle Management na reabilitação de edifícios. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Aveiro.

Meex, E. *et al.* (2018) ‘Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design’, *Building and Environment*. Elsevier, 133(October 2017), pp. 228–236. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.02.016.

Monteiro, H., Fernández, J. E. and Freire, F. (2016) ‘Comparative life-cycle energy analysis of a new and an existing house: The significance of occupant’s habits, building systems and embodied energy’, *Sustainable Cities and Society*. doi: 10.1016/j.scs.2016.06.002.

Motawa, I. and Carter, K. (2013) ‘Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings’, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Elsevier B.V., 74, pp. 419–428. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.03.015.

Motuziene, V. *et al.* (2016) ‘Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: A case study’, *Journal of Cleaner Production*, 112(2016), pp. 532–541. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.103.

Müller, D. B. *et al.* (2013) ‘Carbon emissions of infrastructure development’, *Environmental Science and Technology*, 47(20), pp. 11739–11746. doi: 10.1021/es402618m.

Najjar, M. *et al.* (2017) ‘Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building’, *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd, 14(March), pp. 115–126. doi: 10.1016/j.jobbe.2017.10.005.

NP 15643-2 (2014) ‘Sustentabilidade das obras de construção-Avaliação da sustentabilidade dos edifícios- Parte 2: Enquadramento para a avaliação do desempenho ambiental’.

Ortiz, O., Castells, F. and Sonnemann, G. (2009) ‘Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA’, *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.

Pennington, D. W. *et al.* (2004) ‘Life cycle assessment Part 2 : Current impact assessment practice’, 30, pp. 721–739. doi: 10.1016/j.envint.2003.12.009.

Pieragostini, C., Mussati, M. C. and Aguirre, P. (2012) ‘On process optimization considering LCA methodology’, *Journal of Environmental Management*. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.014.

Pina, H. (2015) ‘Metodologia BIM na Gestão da Manutenção de uma Estação Elevatória, p. 144. Tese apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Aveiro.

Pinho, S. M. F. de (2013) ‘O modelo IFC como agente de interoperabilidade: Aplicação ao domínio das estruturas’, *Tese de Mestrado*, (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto).

Pomponi, F. and Moncaster, A. (2018) ‘Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 81(February 2017), pp. 2431–2442. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.049.

Prateep Na Talang, R. and Sirivithayapakorn, S. (2018) ‘Comparing environmental burdens, economic costs and thermal resistance of different materials for exterior building walls’, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 197, pp. 1508–1520. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.255.

Röck, M. *et al.* (2018) ‘LCA and BIM : Integrated assessment and visualization of building elements ’ embodied impacts for design guidance in early stages’, *Procedia CIRP*. The Author(s), 69 (May), pp. 218–223. doi: 10.1016/j.procir.2017.11.087.

Rodrigues, C. and Freire, F. (2017) 'Adaptive reuse of buildings: Eco-efficiency assessment of retrofit strategies for alternative uses of an historic building', *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.104.

Rodrigues, F. *et al.* (2018) 'Building life cycle applied to refurbishment of a traditional building from Oporto, Portugal', *Journal of Building Engineering*, 17, pp. 84–95. doi: 10.1016/j.jobbe.2018.01.010.

Rodrigues, V. *et al.* (2018) 'LCA of constructing an industrial building: Focus on embodied carbon and energy', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 153, pp. 420–425. doi: 10.1016/j.egypro.2018.10.018.

Rui Santos SA - Cantoneira Abas Iguais. Available at: <http://www.ruisantos-sa.com/perfis-laminados-a- quente?item=4453-cantoneira-abas-iguais&taxonomy=172-perfis-laminados-a- quente> (Accessed: 1 July 2019).

Samani, P. *et al.* (2015) 'A sustainability assessment of advanced materials for novel housing solutions', *Building and Environment*, 92, pp. 182–191. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.012.

Santos, P., Gervásio, H. and da Silva, L. S. (2016) 'A simplified tool to evaluate the sustainability of buildings in steel in early stages of design', *Matériaux & Techniques*, 104(1), p. 103. doi: 10.1051/mattech/2015061.

Santos, R. *et al.* (2016) 'Integração de BIM com Avaliação do Ciclo de Vida : análise do estado da arte e das ferramentas disponíveis, (November). Conference paper CINCOS'16, Lisboa'.

Santos, R. *et al.* (2019) 'Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment', *Automation in Construction*. Elsevier, 103(February), pp. 127–149. doi: 10.1016/j.autcon.2019.02.011.

Schade, J. (2007) 'Life cycle cost calculation models for buildings' Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Luleå University of Technology, Luleå, Sweden', *Building*, pp. 1–9.

Sharma, A. *et al.* (2011) 'Life cycle assessment of buildings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp. 871–875. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.008.

Sierra-Pérez, J. *et al.* (2016) 'Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings', *Journal of Cleaner Production*, 126, pp. 97–107. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.146.

Soares, D. *et al.* (2014) 'Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects : Mechanical and durability performance', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 71, pp. 263–272. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.034.

Soares, N. *et al.* (2017b) 'A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 77(May), pp. 845–860. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.027.

Dinis, R. (2010) 'Contributos para a reabilitação sustentável de edifícios de habitação. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa par obtenção de grau de mestre em Engenharia Civil'.

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. and García-Martínez, A. (2016) 'Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments', *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 103, pp. 215–227. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.04.014.

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. and García-Martínez, A. (2017) 'Critical review of bim-based LCA method to buildings', *Energy and Buildings*. Elsevier, 136, pp. 110–120. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.12.009.

Stocker, T. F. *et al.* (2013) ‘IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change’, *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*.

Stone, C. (2018) *Curren state of BIM in the major countries of the world*. Available at: <https://cupastone.com/bim-countries-world/> (Accessed: 13 July 2019).

Tabela de preços Martins e Ferreira produtos siderúrgicos | Orçamentos. Available at: <https://orcamentos.eu/tabela-de-precos-martins-e-ferreira/> (Accessed: 1 July 2019).

Tran, V. and Tookey, John E, Robertis, J. (2012) ‘Shaving BIM: Establishing a Framework for Future BIM Research in New Zealand’, *International Journal of Construction Supply Chain Management*, 2(2), pp. 66–79. doi: 10.14424/ijcscm202012-66-79.

Upton, B. *et al.* (2008) ‘The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States’, 32, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.07.001.

USDOT, U.S Department Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management, (2002) ‘Life-Cycle Cost Analysis Primer’, *Management*. Available at: <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/010621.pdf>.

Vilches, A., Garcia-Martinez, A. and Sanchez-Montañes, B. (2017) ‘Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review’, *Energy and Buildings*, 135, pp. 286–301. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.042.

Vitale, P. *et al.* (2018) ‘Environmental performances of residential buildings with a structure in cold formed steel or reinforced concrete’, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 189, pp. 839–852. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.088.

Volk, R., Stengel, J. and Schultmann, F. (2014) 'Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs', *Automation in Construction*. Elsevier B.V., 38, pp. 109–127. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.

Wong, J. K. W. and Zhou, J. (2015) 'Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review', *Automation in Construction*. Elsevier B.V., 57, pp. 156–165. doi: 10.1016/j.autcon.2015.06.003.

Woodward, D. G. (1997) 'Life Cycle Costing - Theory Information Acquisition and Application.' *International Journal of Project Management*, Vol 15, No(6), pp. 335–344, *Elsevier*. doi: 10.1016/S0263-7863(96)00089-0.

Zhang, X. and Su, X. (2007) 'Comparison of LCA on steel- and concrete-construction office buildings: A case study', *IAQVEC 2007 Proceedings - 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings: Sustainable Built Environment*, pp. 1–9.

Zhang, Y. *et al.* (2019) 'A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 209, pp. 115–125. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078.

Anexos

Anexos

- A. *Softwares* de CCV
- B. Vantagens e desvantagens dos métodos de avaliação económica
- C. *Softwares* de ACV
- D. Plantas de arquitetura
- E. Dados justificativos

ANEXOS

A. Softwares CCV

Tabela A.1 – Softwares CCV

Software	Empresa	Áreas de aplicação	Entradas	Saídas	Finalidade
ACEIT	Tecolote Research Inc, USA	Todas as áreas em geral	-WBS (Work Breakdown Structure); -Quantidade e custo de material; -Taxa de desconto	VAL	É uma ferramenta CCV genérica que auxilia na gestão de programas de apoio e de custo durante todas as fases do ciclo de vida de um projeto. A folha de cálculo apresenta os custos e define os valores de entrada. É a principal ferramenta para análise, desenvolvimento e partilha das estimativas de custos, através de uma estrutura que padroniza o processo de estimativa (ACEIT 2018).
RealCost 2.1	Department of Transportation US	Projetos Rodoviários	-Número de vias, dados relativos ao tráfego, período de análise e construção, custo de manutenção, vida útil do pavimento, fator de desconto	VAL	É limitado aos projetos rodoviários ; Permite comparar simultaneamente duas alternativas (Matos 2016).
LCCWare 3.0	Isograph Inc, US	Modelo genérico de CCV	-Os custos são guardados em árvore como estrutura de divisão de custo	VAL	Permite que os dados sejam importados do MS Access e do MS Excel (Matos 2016)

B. Vantagens e desvantagens dos métodos de avaliação económica

Método	Objetivos	Vantagens	Desvantagens
Payback simples	Compara diretamente as receitas com os custos e determina o período necessário para recuperar o investimento inicial. Quanto maior o tempo, maior será o risco para o investidor.	Cálculo simples, rápido e de fácil interpretação. É adequado para a avaliação de projetos de risco elevado.	Não considera a inflação, juros ou fluxos de caixa, por isso, é considerada uma estimativa grosseira.
Payback atualizado	Determina o período de retorno do investimento realizado. Quanto menor for o <i>payback</i> atualizado, menor será o risco.	O tempo de retorno do investimento calculado é maior do que o do <i>payback</i> simples, porque é mais próximo do período de recuperação real.	Não considera os <i>cash flows</i> após o período de recuperação e não quantifica a rentabilidade do projeto.
Valor atual liquido	É o valor liquido de todas as receitas e despesas do projeto em todo o seu ciclo de vida.	Considera o valor temporal do dinheiro.	Não é de fácil interpretação e não pode ser usado quando as alternativas têm diferentes durações.
Custo anual equivalente	É o custo anual de possuir e operar um ativo durante toda a sua vida útil.	Permite comparar alternativas que não têm a mesma duração.	Dá incertezas relativamente ao valor das taxas de juro e inflações futuras.
Taxa interna de retorno	Determina a taxa de juro de atualização que permite igualar o somatório dos <i>cash flows</i> de exploração ao somatório dos investimentos.	Útil quando se desconhecem as condições específicas de financiamento e quando as alternativas têm diferentes vidas úteis. Os resultados são de fácil interpretação.	Não permite ordenar os projetos de investimento segundo a perspetiva que interessa ao empresário.
Poupança liquida	Corresponde à diferença entre o valor dos rendimentos gerados por um investimento e o valor investido.	É de fácil interpretação.	É utilizado apenas quando o investimento gera uma renda.

C. Softwares de ACV

Tabela C.1 – *Softwares ACV* – Nível 1

Software	Empresa	Objetivo de aplicação
BEES 3.0	National Institute of Standards and Technology	<i>Building Environmental and Economic Sustainability</i> Inclui dados reais de desempenho ambiental e económico e auxilia na seleção de produtos de construção. Mede o desempenho ambiental dos produtos de construção, utilizando a abordagem de ACV, especificada nas normas ISO 14040. Está projetado para ser prático, flexível e transparente na análise de todas as fases de um projeto (Maia, 2013).
GaBi 8.7.1	PE INTERNATIONAL	É uma ferramenta utilizada com o objetivo de elaborar avaliações do ciclo de vida, com base numa grande quantidade de dados (Maia, 2013).
SimaPro 9.0	Pre Consultants	É uma ferramenta que permite recolher, analisar e monitorar o desempenho ambiental dos produtos e serviços. Permite ainda modelar e analisar os ciclos de vida completos, de forma sistemática e transparente, segundo as normas ISO 14040 (Maia, 2013).

Tabela C.2 – *Softwares* ACV – Nível 2

Software	Empresa	Objetivo de aplicação
ENVEST	Building Research Establishment, UK	É uma ferramenta utilizada para avaliar o impacto ambiental dos edifícios nas primeiras fases de conceção. Tem a capacidade de identificar os elementos e os processos com maior impacto ambiental. Para além disso, faz uma análise do Custo do Ciclo de Vida e mostra os efeitos da seleção de materiais diferentes (ENVEST, 2018).
EQUER	Centre for Energy and Processes, France	É uma ferramenta de simulação que fornece indicadores quantitativos de ambiente de qualidade para diversos fatores. É ideal para estudar o edifício como um todo (Matos 2016).
Athena	Athena Institute, Canada	É uma ferramenta que permite comparar vários cenários alternativos e ajuda a tomar decisões desde a fase de projeto. Possui uma sólida base de dados de inventário de ciclo de vida que fornece informações científicas e precisas do crade-to-grave (Maia, 2013).

Tabela C.3 – *Softwares ACV – Nível 3*

Software	Empresa	Objetivo de aplicação
BREEAM	Buildind Research Establishment, UK	É uma ferramenta utilizada para avaliar o impacto ambiental dos edifícios nas fases de gestão, uso de energia, saúde e bem-estar, poluição, transporte, uso da terra, ecologia, materiais e água. O objetivo é minimizar os efeitos negativos dos edifícios, não desagregando a importância do conforto e saúde nos espaços interiores (Matos 2016; Motawa and Carter 2013).
CEEQUAL	Maintained by CIRIA and Crane Environmental Ltd, UK	É aplicável a qualquer projeto de engenharia civil e inclui aspetos ambientais (uso de água, energia, terra), bem como, a paisagem, ecologia, incómodo para os vizinhos, arqueologia, minimização e gestão de resíduos e amenidades locais (Matos 2016).
LEED	The U.S. Green Building Council (USGBC)	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> O LEED classifica os edifícios de acordo com os pontos obtidos nas seguintes categorias: implantação sustentável, utilização racional da água, energia e atmosfera, materiais e recursos e qualidade do ambiente interior. O objetivo é estabelecer um padrão comum de avaliação dos edifícios e servir como exemplo para a construção sustentável (Matos 2016).

D. Plantas de arquitetura

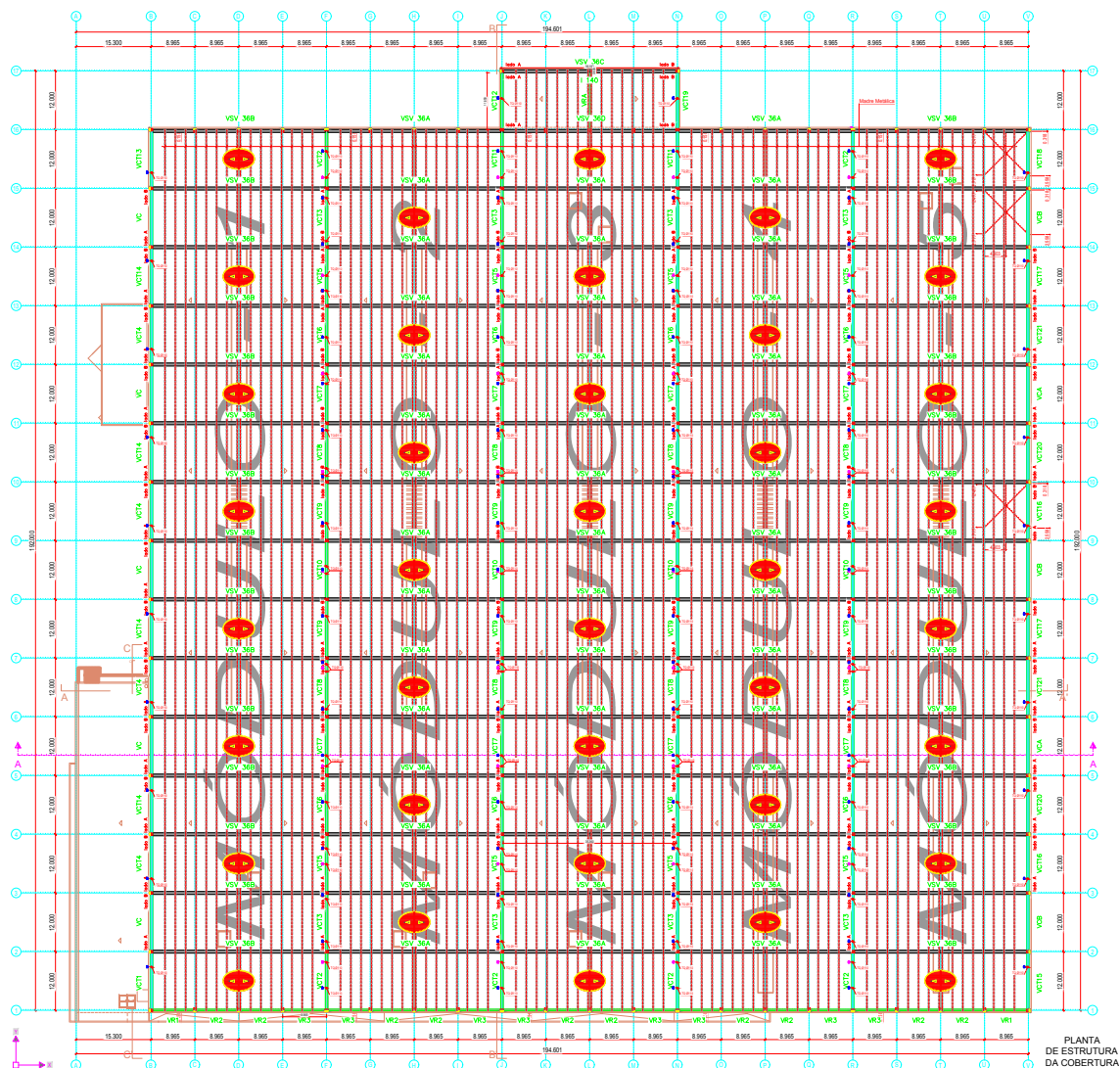


Figura 32-Planta de cobertura

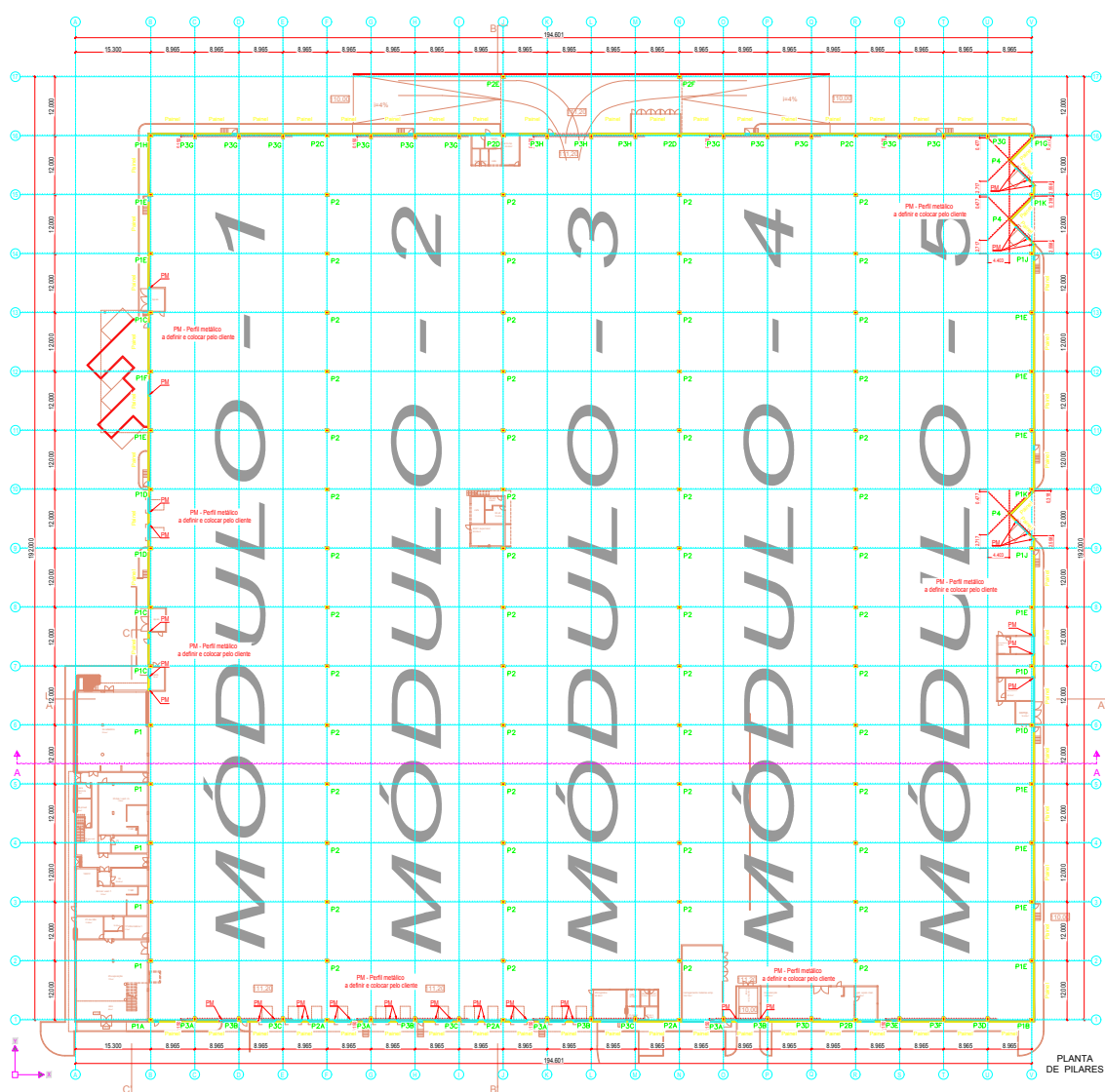


Figura 33-Planta de pilares

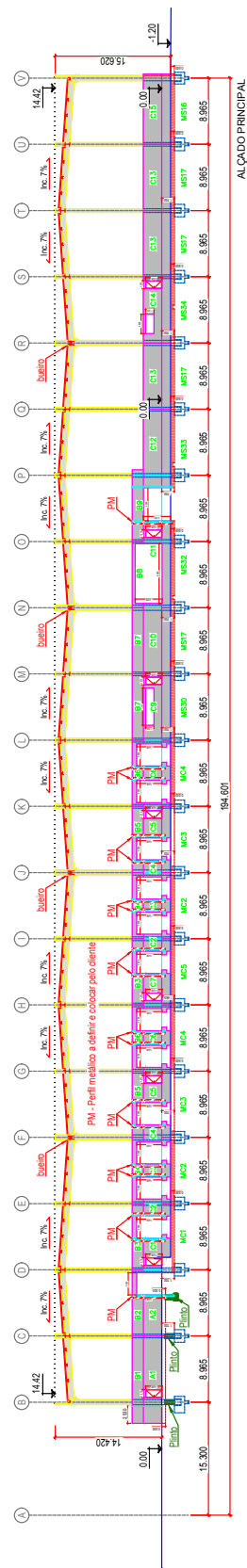
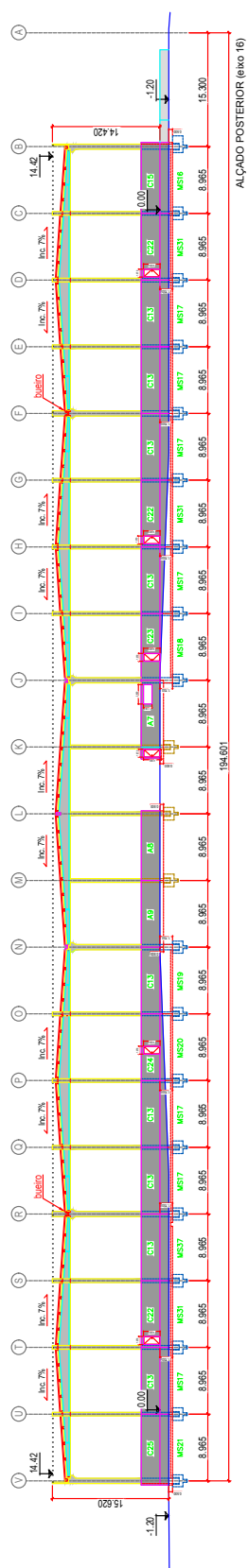


Figura 34-Planta do alçado principal



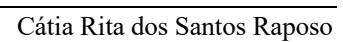
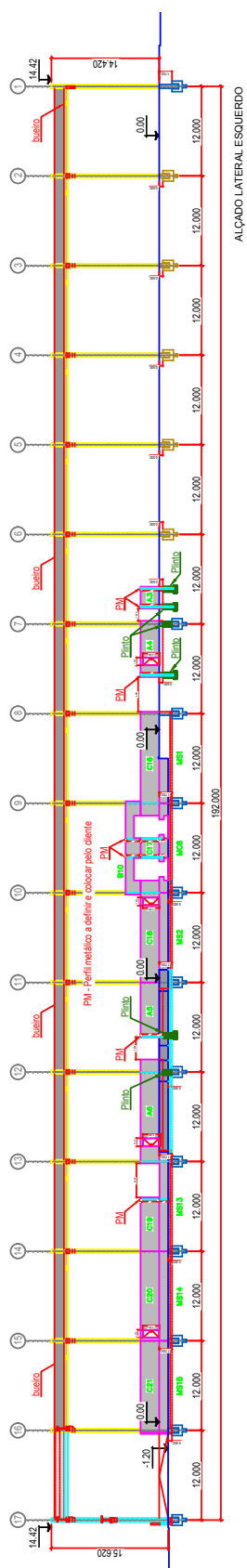


Figura 36-Planta do alçado lateral esquerdo



E. Dados justificativos

Custo de execução do pavilhão novo

-Pilares

Pilares sem cachorro (P3H)

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=0|0_0|2|EPS010|eps_010: 0 6 0 1 0 0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha010gwa	Ud	Pilar pré-fabricado de betão armado de secção 60x50 cm, de 15 m de altura, para acabamento aparente do betão, sem consolas.	1,000	1.205,86	1.205,86
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,756	66,84	50,53
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,760	19,31	14,68
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	1,520	18,78	28,55
	%	Custos directos complementares	2,000	1.299,62	25,99
Custo de manutenção decenal: 92,79€ nos primeiros 10 anos.				Total:	1.325,61

Pilares sem cachorro (P4)

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=5|0_0|1|EPS010|eps_010: 0 2 4 0 0 0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha010cka	Ud	Pilar pré-fabricado de betão armado de secção 40x40 cm, de 8 m de altura, para acabamento aparente do betão, sem consolas.	1,000	450,02	450,02
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,462	66,84	30,88
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,464	19,31	8,96
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,929	18,78	17,45
	%	Custos directos complementares	2,000	507,31	10,15
Custo de manutenção decenal: 36,22€ nos primeiros 10 anos.				Total:	517,46

Pilares com 1 cachorro

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0|2|EPS010|eps_010: 0_6_0_0_0_0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha010gxg	Ud	Pilar pré-fabricado de betão armado de secção 60x50 cm, de 15 m de altura, para acabamento aparente do betão, com uma consola a uma face.	1,000	1.248,13	1.248,13
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,756	66,84	50,53
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,760	19,31	14,68
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	1,520	18,78	28,55
	%	Custos directos complementares	2,000	1.341,89	26,84
Custo de manutenção decenal: 95,81€ nos primeiros 10 anos.				Total:	1.368,73

Pilares com 2 cachorros

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0|3|EPS010|eps_010: 0_6_0_1_0_0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha010gxg	Ud	Pilar pré-fabricado de betão armado de secção 60x50 cm, de 15 m de altura, para acabamento aparente do betão, com duas consolas a duas faces e ao mesmo nível.	1,000	1.291,71	1.291,71
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,756	66,84	50,53
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,760	19,31	14,68
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	1,520	18,78	28,55
	%	Custos directos complementares	2,000	1.385,47	27,71
Custo de manutenção decenal: 98,92€ nos primeiros 10 anos.				Total:	1.413,18

-Vigas

VCT

Link:http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0|0|EPV010|epv_010:_1_0_0_1_0_0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha040dbbF1	m	Viga pré-fabricada de betão armado tipo L, de 40 cm de largura de alma, 30 cm de altura do banzo, 50 cm de largura total e 50 cm de altura total, com um momento flector máximo de 340 kN·m, segundo EN 13225.	1,000	120,18	120,18
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,050	66,84	3,34
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,051	19,31	0,98
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,101	18,78	1,90
	%	Custos directos complementares	2,000	126,40	2,53
Custo de manutenção decenal: 9,03€ nos primeiros 10 anos.				Total:	128,93

VR1

Link:http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0|0|EPV010|epv_010:_0_0_0_0_0_0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha040aaaa1	m	Viga pré-fabricada de betão armado tipo L, de 30 cm de largura de alma, 30 cm de altura do banzo, 45 cm de largura total e 45 cm de altura total, com um momento flector máximo de 250 kN·m, segundo EN 13225.	1,000	106,68	106,68
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,050	66,84	3,34
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,051	19,31	0,98
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,101	18,78	1,90
	%	Custos directos complementares	2,000	112,90	2,26
Custo de manutenção decenal: 8,06€ nos primeiros 10 anos.				Total:	115,16

VSV

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0|0|EPV010|epv_010: 2_0_0_0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07pha050d	m	Viga pré-fabricada de betão armado tipo I, de 90 cm de altura e 20 cm de largura de alma, com um momento flector máximo de 1100 kN·m, segundo EN 13225.	1,000	115,04	115,04
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,050	66,84	3,34
mo046	h	Oficial de 1ª montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,051	19,31	0,98
mo093	h	Ajudante de montador de estruturas pré-fabricadas de betão.	0,101	18,78	1,90
	%	Custos directos complementares	2,000	121,26	2,43
Custo de manutenção decenal: 8,66€ nos primeiros 10 anos.				Total:	123,69

-Painéis

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=2|0_1|3|FPP020|fpp_020: 0_1_0_0_0_2_1_19_0_100_5

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt12pph010ao	m²	Painel pré-fabricado, liso, de betão armado de 16 cm de espessura, 3 m de largura e 14 m de comprimento máximo, com os bordos macho-fêmea, acabamento liso de cor cinzento a uma face, para formação de parede. Segundo EN 14992.	1,000	61,60	61,60
mt12pph011	kg	Pasta borracha-asfáltica para vedação a frio de juntas de painéis pré-fabricados de betão.	1,200	1,96	2,35
mt50spa052b	m	Pranchão de madeira de pinho, de 20x7,2 cm.	0,020	4,39	0,09
mt50spa081a	Ud	Escora metálica telescópica, até 3 m de altura.	0,013	13,37	0,17
mq07gte010c	h	Autogrua de braço telescópico com uma capacidade de elevação de 30 t e 27 m de altura máxima de trabalho.	0,222	66,84	14,84
mo050	h	Oficial de 1ª montador de painéis pré-fabricados de betão.	0,353	19,03	6,72
mo097	h	Ajudante de montador de painéis pré-fabricados de betão.	0,353	17,97	6,34
	%	Custos directos complementares	2,000	92,11	1,84
Custo de manutenção decenal: 6,58€ nos primeiros 10 anos.				Total:	93,95

Demolição

Link: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=2|0_1|3|FPP020|fpp_020: 0_1_0_0_0_2_1_19_0_100_5

De seguida é possível analisar a quantidade de materiais obtidos após a demolição do pavilhão.

Código LER	Tipo	Peso (kg)	Volume (l)
01 04 08	Gravilhas e fragmentos de rocha não abrangidos 01 04 07.	665 981,44	443 987,63
17 01 01	Betão (betões, argamassas e pré-fabricados).	26 578 682,40	17 719 121,60
17 01 02	Tijolos.	6 689 928,95	5 351 943,16
17 01 03	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.	608 175,36	486 540,29
17 02 01	Madeira.	83 074,61	75 522,37
17 02 02	Vidro.	51 921,63	51 921,63
17 02 03	Plástico.	27 691,54	46 152,56
17 03 02	Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01.	34 614,42	34 614,42
17 04 07	Mistura de metais.	470 756,11	313 837,41
17 05 04	Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03.	998 972,16	624 357,60
17 08 02	Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.	1 824 526,08	1 824 526,08
17 09 04	Mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03.	359 989,97	239 993,31
Resíduos gerados:		38 394 314,66	27 212 518,05

Custo do reforço sísmico

-Ancoragem mecânica

Link: http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Betao_armado/Ancoragens_estruturais/EHW022_Ancoragem_mecanica_d_e_corte_interio_0_0_0_0_0_1_0_3_1.html

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt26ahi055x	Ud	Ancoragem mecânica de segurança por corte interior, de aço galvanizado qualidade 8.8, segundo EN ISO 898-1, M20x250/100, para colocar depois da peça a fixar, de 20 mm de diâmetro e 410 mm de comprimento, composta por corpo com cabeça roscada e base em forma de cone, porca, anilha, camisa com batente para manga de expansão e corte interior, secção de plástico, e manga de expansão e corte interior, para fixação de peças de 100 mm de espessura máxima sobre elementos de betão, fissurados ou não fissurados.	1,000	74,33	74,33
mo020	h	Oficial de 1ª construção.	0,106	18,48	1,96
mo112	h	Operário especializado construção.	0,106	17,84	1,89
	%	Custos directos complementares	2,000	78,18	1,56
Custo de manutenção decenal: 5,58€ nos primeiros 10 anos.				Total:	79,74

-Argamassa Grout

Link: http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/calculaprecio.asp?Valor=3|0_0|0|EHW030|ehw_030:_0_0_0_0

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt09rem150a	kg	Argamassa de três componentes à base de resina epóxi, Planigrout 300 "MAPEI SPAIN", para ancoragens e reparação estrutural do betão, segundo NP EN 1504-6.	2,000	8,00	16,00
mo020	h	Oficial de 1ª construção.	0,006	18,48	0,11
mo113	h	Operário não qualificado construção.	0,006	17,39	0,10
	%	Custos directos complementares	2,000	16,21	0,32
Custo de manutenção decenal: 1,16€ nos primeiros 10 anos.				Total:	16,53

Cálculo da quantidade de argamassa

- 1- Calcular a área de corte

$$A = \pi r^2 = \pi \times 18,5^2 \times 10^{-3} = 0,00108 \text{ m}^2$$

- 2- Calcular a quantidade de argamassa por corte

Sabendo que :

$$\begin{array}{l} 2 \text{ kg} \text{---} 1 \text{ m}^2 \\ x \text{---} 0,00108 \text{ m}^2 \end{array}$$

então, $x=0,00215 \text{ kg}$

Se

$$\begin{array}{l} 0,00215 \text{ kg} \text{---} 1 \text{ mm} \\ x_2 \text{---} 250 \text{ mm} \end{array}$$

em que, $x_2=0,5376 \text{ kg/corte}$

3- Cálculo da argamassa total

Portanto, se são 215 cortes, a quantidade total de argamassa é de $215 \times 0,5376=115,59 \text{ kg}$.

4- Cálculo do custo total

Cada saco de 2 kg tem um custo de 16,53 €, por isso, para 115,59 kg, o custo total é de **955,31 €**.

Porém, será contabilizada a quantidade obtida no Tally, ou seja, 116, 51 kg, o que equivale a um custo total de **962,95 €**.

-Elementos de fixação

Link: http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Metalicas/Reforços/EAZ010_Aco_laminado_a_quente_para_reforço_0_0_0_1_1_1_0_0_1.html

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mt07ala240hf	kg	Aço laminado EN 10025 S275JR, em peça simples de perfis laminados a quente das séries L, LD, T, redondo, quadrado, rectangular e chapa, acabamento galvanizado a quente, moldando elementos de ancoragem, trabalhado em oficina, para fixar em obra mecanicamente com parafusos de aço normalizados segundo EN ISO 898-1, de aplicação em reforços estruturais.	1,000	1,82	1,82
mo047	h	Oficial de 1ª montador de estruturas metálicas.	0,016	19,31	0,31
mo094	h	Ajudante de montador de estruturas metálicas.	0,016	18,78	0,30
	%	Custos directos complementares	2,000	2,43	0,05
Custo de manutenção decenal: 0,07€ nos primeiros 10 anos.				Total:	2,48

Peso do elemento de fixação: Com recurso à (*Rui Santos SA - Cantoneira Abas Iguais*), estimou-se que para um elemento de fixação painel-pilar pesaria 0,4 kg (parafusos incluídos) e um elemento de fixação viga-pilar pesaria 1kg.

Preço do varão: Com recurso à (*Tabela de preços Martins e Ferreira produtos siderúrgicos | Orçamentos*) obteve-se o preço do varão por kg, por isso, para um diâmetro de 20 mm, o preço de um varão com 6 metros é 0,785 euros/kg.

Mão de obra: Considerou-se que os operários colocam 1 varão em 20 minutos, por isso, com recurso ao CYPE obteve-se o preço por hora de um oficial estruturista e um operário especializado em construção.

Mão de Obra	Preço por hora (€/h)	Importância (€)
Oficial 1º estruturista	19,31	6,44 €
Operário especializado construção	17,84	5,95 €

Equipamento:

Estimou-se uma duração de 50 minutos para a colocação de varões na viga-viga e de 50 minutos para a colocação do cabo entre a viga e o pilar. Na ligação pilar-painel, considerou-se que a colocação de cada elemento de fixação faz-se em 10 minutos.

Assim, optou-se pelo “Aluguer diário de cesta elevatória de braço articulado, motor diesel, de 25 m de altura máxima de trabalho, incluindo manutenção e seguro de responsabilidade civil,”

Link: http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Trabalhos_previos/Andaimes_e Equipamento_de_elevacao/Plataformas_elevatorias/Aluguer_de_plataforma_elevatoria_0_0_1_0_3.html

Unitário	Ud	Descrição	Rend.	Preço unitário	Importância
mq07ple010bk	Ud	Aluguer diário de cesta elevatória de braço articulado, motor diesel, de 25 m de altura máxima de trabalho, incluindo manutenção e seguro de responsabilidade civil.	1,165	200,00	233,00
	%	Custos directos complementares	2,000	233,00	4,66
				Total:	237,66

